

**Evolutionärer Algorithmus für die  
automatisierte Fertigung in der Dentaltechnik**

Dem Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. (BA) Reinhard Heister, M.Sc.**  
aus Offenbach am Main

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele  
Tag der Einreichung: 02.08.2016  
Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2016

Darmstadt 2016

D17



Forschungsberichte aus dem Fachgebiet  
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 57

**Reinhard Heister**

**Evolutionärer Algorithmus für die automatisierte  
Fertigung in der Dentaltechnik**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. 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 978-3-8440-5149-0

ISSN 1435-1129

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# GELEITWORT DES HERAUSGEBERS

---

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotentiale, die im Entstehungsprozess neuer Produkte auszu-schöpfen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz der modernen IKT in der Produktentstehung vorliegen und neue Methoden wissenschaftlich abgesichert sind. Darüber hinaus stellen die wissenschaftliche Durchdringung und die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse eine abgestimmte Kooperation zwischen Forschung und Industrie dar.

Vor diesem Hintergrund informiert diese Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) des Fachbereichs Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Ziel der Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentstehungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Herstellung neuer Produkte.

Der Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Dissertation fokussiert die Dentaltechnik. Das ursprünglich handwerklich geprägte Gewerbe erfährt seit den 1990er Jahre einen spektakulären Wandel hin zur Digitalisierung und Automatisierung der Produktentstehungsprozesse. Die bisherige automatisierte Fertigung von Dentalprodukten ist geprägt durch ineffiziente Prozesse infolge einer fehlenden Auftragsverteilung, geringen Fertigungslosumfängen und manuellen Arbeitsvorbereitungsvorgängen. Dadurch müssen bislang Kosten-, Durchlaufzeit- und Qualitätsnachteile hingenommen werden.

Herr Heister nimmt sich dieser Problemstellung anhand der vorliegenden Dissertation an und entwickelt die Grundlagen für eine neue Art der Auftragsverteilung in der Dentaltechnik. Diese basiert auf einer algorithmenbasierten Arbeitsvorbereitung, welche das Packproblem mittels evolutionärer Mechanismen automatisiert löst. Der von ihm entwickelte evolutionäre Algorithmus automatisiert den Vorgang des Packens mehrerer Werkstücke von Aufträgen unterschiedlicher Auftraggeber in Halbzeuge von Betriebsmitteln unterschiedlicher Auftragnehmer zu Fertigungslosen mit maximierter Materialausnutzung. Seine Dissertation liefert somit einen wichtigen Beitrag zur wirtschaftli-

chen Fertigung individueller Dentalprodukte im Rahmen eines industriellen Wertschöpfungsnetzwerks. Gleichmaßen wird eine Verbesserung in der zahnmedizinischen Versorgung in puncto Kosten, Zeit und Qualität erwartet, die wesentlich dazu beiträgt, die Lebensqualität des Patienten zu erhöhen.

Darmstadt, Februar 2017

Reiner Anderl

# VORWORT DES AUTORS

---

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK, für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie seinen wissenschaftlichen Weitblick, mit dem er meine Dissertation begleitete. Besonders zeichnet ihn aus, dass er stets die richtigen Fragen mit enormer Tragweite stellt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Leiter des Fachgebiets Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), danke ich für die Übernahme des Korreferates, der fachlichen Diskussion und der kritischen Durchsicht meiner Dissertation.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets DiK danke ich für die freundliche Arbeitsatmosphäre, die gute Zusammenarbeit und die konstruktiven Fachdiskussionen. Hervorheben möchte ich hierbei Herrn Dr.-Ing. Christian Mosch, der mir mit seinem Fachwissen und wissenschaftlichem Fingerspitzengefühl stets zur Seite stand; darüber hinaus verbindet uns eine tiefe Freundschaft. Auch bei Herrn Christian Steinmetz, Herrn Oliver Sandig, Herrn Sören Dietz und Frau Dr.-Ing. Lucia Mosch möchte ich mich für die fachliche Unterstützung bedanken. Ebenso danke ich Frau Christina May-Fritsch und Frau Dorle Ellmers für die Korrektur meiner Dissertation. Weiterer großer Dank gilt Herrn Dr. med. dent. Christof Ellerbrock und Herrn Thomas Jobst, die mich kompetent bei dentaltechnischen Fragestellungen unterstützt und mir Betriebsmittel des Dentallabors Form for Function GmbH für die Validierung meines Konzepts zur Verfügung gestellt haben.

Die vorliegende Dissertation entstand während der Elternzeit mit meiner Tochter Samantha Heister. Ohne eine gute Organisation und viel Disziplin wäre die Erstellung meiner Dissertation nicht möglich gewesen. Daher bedanke ich mich bei meiner gesamten Familie und insbesondere bei meiner Mutter Arfia-Nita Heister, die durch ihre Liebe, Richtung, Zuspruch und große Unterstützung einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen meiner Promotion geleistet hat. Mein größter Dank gilt meiner Frau Angela Heister, die mir stets Geduld und Verständnis, gepaart mit Entbehrungen und eigenen Aufopferungen entgegenbrachte, und das in einer Selbstverständlichkeit, mit der sie meine Ziele

gleichermaßen wie ihre eigenen verfolgt. Außerdem möchte ich mich bei meiner Tochter Samantha Heister bedanken. Sie hat mir gezeigt, worauf es im Leben wirklich ankommt, und mir den Freiraum zum Schreiben der Dissertation gegeben, während sie schlief. Die Bewältigung der herausfordernden Situation mit Familie, Beruf, Elternzeit und Promotion hat mir gezeigt, welches Ausmaß die eigene Willensstärke, Liebe zur Familie und Hingebung bis zur Erschöpfung annehmen kann.

Darmstadt, Februar 2017

Reinhard Heister

# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Rechnerunterstützte Fertigung in der Dentaltechnik.....	2
1.2	Motivation und Problemstellung.....	3
1.3	Zielsetzung.....	6
1.4	Aufbau der Dissertation.....	8
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>9</b>
2.1	Arbeitsvorbereitung.....	9
2.1.1	Arbeitsplanung.....	11
2.1.2	Arbeitssteuerung.....	12
2.1.3	Fazit zur Arbeitsvorbereitung.....	13
2.2	Fertigung verteilter Aufträge.....	14
2.2.1	Morphologie existierender Fabriktypen.....	14
2.2.2	Virtuelle Fabrik.....	15
2.2.3	Cloud Manufacturing.....	16
2.2.4	Fazit zur Fertigung verteilter Aufträge.....	17
2.3	Produktdatentechnologie.....	18
2.3.1	Produkt- und Produktdatenmodelle.....	18
2.3.2	Geometriemodelle.....	19
2.3.3	CAX-Prozessketten.....	21
2.3.4	Fazit zur Produktdatentechnologie.....	22
2.4	Dentaltechnik.....	23
2.4.1	Dentalprodukte.....	23
2.4.2	Rechnerunterstützte Prozesse in der Dentaltechnik.....	25
2.4.3	Prozessketten in der Dentaltechnik.....	28
2.4.4	Produktdatenmodelle in der Dentaltechnik.....	30

2.4.5	Fazit zur Dentaltechnik .....	31
2.5	Klassifikation und Priorisierung .....	32
2.5.1	Klassifikation .....	32
2.5.2	Priorisierung.....	33
2.5.3	Fazit zu Klassifikation und Priorisierung.....	34
2.6	Packproblem .....	35
2.6.1	Zuschnitt- und Packproblem.....	36
2.6.2	Typologie des Packproblems.....	37
2.6.3	Komplexitätstheorie.....	40
2.6.4	Mengentheorie, Bedingungen und Optimierungsmodelle .....	42
2.6.5	Allgemein relevante Packprobleme.....	45
2.6.6	Speziell relevante Packprobleme .....	47
2.6.7	Fazit zum Thema Packproblem.....	49
2.7	Grundlagen evolutionärer Algorithmen.....	50
2.7.1	Algorithmus im Allgemeinen .....	50
2.7.2	Arten von Algorithmen .....	51
2.7.3	Heuristische und meta-heuristische Verfahren.....	52
2.7.4	Natürliche Evolution als Vorbild .....	54
2.7.5	Begriffe und evolutionäre Mechanismen .....	55
2.7.6	Evolutionärer Zyklus .....	56
2.7.7	Evolutionäre Standardalgorithmen und formale Beschreibung.....	57
2.7.8	Fazit zu den Grundlagen evolutionärer Algorithmen .....	59
2.8	Packalgorithmen .....	60
2.8.1	Packalgorithmen in CAM-Systemen für die Dentaltechnik.....	60
2.8.2	Publikationen zu Packalgorithmen in der Dentaltechnik.....	61
2.8.3	Publikationen zu Kreispackalgorithmen.....	61
2.8.4	Publikationen zu evolutionären Packalgorithmen.....	62
2.8.5	Fazit zu den Packalgorithmen.....	62
3	Anforderungsprofil .....	63
3.1	Handlungsbedarf .....	63
3.2	Zieldefinition .....	64
3.3	Betrachtete Anwendungsfälle.....	65
3.4	Anforderungen.....	69

---

3.4.1	Anforderungen an den evolutionären Algorithmus .....	69
3.4.2	Anforderungen an das Gesamtsystem .....	73
3.5	Übersicht der Anforderungen und Fazit .....	75
4	Konzept .....	77
4.1	Allgemeine Definitionen .....	79
4.1.1	Terminologie .....	79
4.1.2	Mengentheoretische Betrachtung .....	82
4.1.3	Klassenorientierte Betrachtung .....	84
4.1.4	Problemdefinition und Optimierungsmodell .....	87
4.2	Evolutionsbasierter Arbeitsvorbereitungsprozess .....	88
4.3	Aktivitäten und Datenstrukturen der Akteure .....	91
4.3.1	Auftraggeber .....	91
4.3.2	Auftragnehmer .....	92
4.4	Vorverarbeitung .....	93
4.4.1	Objektrepräsentation .....	94
4.4.2	Klassifikation und Priorisierung .....	101
4.5	Spezifische Definitionen .....	105
4.5.1	Kreisgleichung .....	105
4.5.2	Nichtüberlappingsbedingung .....	106
4.5.3	Enthaltenseinbedingung .....	108
4.5.4	Manipulationsfunktionen .....	109
4.5.5	Spezifische Phi-Funktionen .....	111
4.5.6	Suchraum, Phänotyp und Genotyp .....	112
4.6	Übersicht über die simulierte Evolution .....	113
4.7	Heuristischer Teil der simulierten Evolution .....	115
4.7.1	Zusammenhang Phänotyp, Genotyp und Individuum .....	115
4.7.2	Erste Indikation in leeren Blank packen .....	118
4.7.3	Zweite Indikation in Blank mit einer Indikation packen .....	118
4.7.4	Nächste Indikationen in Blank mit mehreren Indikationen packen .....	122
4.7.5	Prüfung der Enthaltenseinbedingung .....	130
4.7.6	Fitnessbewertung eines Individuums .....	131
4.8	Meta-heuristischer Teil der simulierten Evolution .....	133
4.8.1	Generierung der ersten Generation .....	135

4.8.2	Generierung von Individuen nächster Generationen.....	139
4.8.3	Abbruchkriterium und Ergebnis.....	144
4.9	Nachverarbeitung.....	144
4.10	Fazit.....	146
<b>5</b>	<b>Implementierung.....</b>	<b>149</b>
5.1	Verwendete Technologien.....	150
5.1.1	Softwareplattform und Entwicklungsumgebung.....	150
5.1.2	Architekturmuster und Programmiersprachen.....	151
5.1.3	Anwendungen, Maschine und Material.....	152
5.2	Architektur des Gesamtsystems.....	152
5.3	Prototypische Implementierung von DentPool.....	154
5.3.1	SQL-Datenbank.....	155
5.3.2	Model.....	156
5.3.3	Controller.....	157
5.3.4	View.....	158
5.4	Prototypische Implementierung des evolutionären Algorithmus.....	158
5.4.1	Vor- und Nachverarbeitung.....	159
5.4.2	Simulierte Evolution.....	159
5.5	Benutzeroberfläche der Implementierung.....	162
5.5.1	Benutzerverwaltung.....	162
5.5.2	Auftragsverwaltung.....	164
5.5.3	Evolutionstbasierter Fertigungslosgenerator.....	166
5.5.4	Fertigungslosverwaltung.....	169
5.6	Fazit.....	171
<b>6</b>	<b>Validierung.....</b>	<b>173</b>
6.1	TestszENARIO für den evolutionären Algorithmus.....	173
6.1.1	Registrierte Benutzer.....	173
6.1.2	Erzeugung von Testdaten.....	174
6.1.3	Erstellte Aufträge.....	176
6.1.4	Testbenutzer und dessen Aufträge.....	177
6.2	Durchführung der Validierung.....	178
6.2.1	Auftrag anlegen und verwalten.....	178
6.2.2	Fertigungslose evolutionstbasiert generieren.....	180

6.2.3	Fertigungslose annehmen und Fertigungsdaten herunterladen .....	182
6.2.4	Fertigung angenommener Fertigungslose .....	186
6.2.5	Statusänderung von Fertigungslos und Auftrag .....	187
6.3	Laufzeitverhaltensanalyse in simulierter Evolution .....	188
6.4	Ergebnisse gegenüber den Anforderungen .....	192
6.5	Fazit .....	194
<b>7</b>	Ausblick .....	195
7.1	Weiterführende Entwicklungspotentiale .....	195
7.2	Weiterführende Forschungspotentiale .....	196
<b>8</b>	Zusammenfassung .....	197
Literatur .....		199



# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abbildung 1.1: Einordnung der Dissertation in den PLZ .....	1
Abbildung 1.2: CAD/CAM-Prozess in der Dentaltechnik .....	3
Abbildung 1.3: Konventionelle Packalgorithmen in der Dentaltechnik.....	5
Abbildung 1.4: Neuer Packalgorithmus zur Auftragsverteilung .....	6
Abbildung 2.1 Bereiche der Produktion.....	10
Abbildung 2.2: Aufgaben der Arbeitssteuerung .....	12
Abbildung 2.3: Fabriktypen in den verschiedenen Betrachtungsebenen.....	15
Abbildung 2.4: Schichtenarchitektur eines Cloud Manufacturing Systems .....	17
Abbildung 2.5: Ordnungsschema geometrischer Modelle.....	19
Abbildung 2.6: Beziehung zwischen geometrischen und topologischen Elementen... 20	
Abbildung 2.7: Drei Kopplungsvarianten der Prozesskette CAD-NC .....	21
Abbildung 2.8: Schritte in der Versorgung mittels dreigliedriger Brücke.....	24
Abbildung 2.9: Zahnschemata nach dem FDI-System.....	25
Abbildung 2.10: CAD/CAM-Prozesse in der Dentaltechnik.....	27
Abbildung 2.11: Prozessketten in der Übersicht .....	29
Abbildung 2.12: Aufbau STL-Format und Beispiel einer Teleskopkrone .....	31
Abbildung 2.13: Verbesserte Typologie .....	39
Abbildung 2.14: Verfeinerte Problemkategorien .....	39
Abbildung 2.15: Zyklus bei evolutionären Algorithmen .....	56
Abbildung 2.16: Codierte Darstellung des Suchraums.....	58
Abbildung 2.17: Zusammenhänge eines Individuums .....	58
Abbildung 3.1: Anwendungsfälle in der evolutionsbasierten Arbeitsvorbereitung .....	67
Abbildung 4.1: Konzeptbausteine.....	77
Abbildung 4.2: Struktur der Konzeptelemente sowie Gliederung von Kapitel 4 .....	78
Abbildung 4.3: Grafische Darstellung zur Terminologie .....	82
Abbildung 4.4: Euler-Diagramme ohne und mit Packalgorithmus .....	83
Abbildung 4.5: Klassendiagramm ohne evolutionären Algorithmus .....	86
Abbildung 4.6: Klassendiagramm mit evolutionärem Algorithmus.....	87
Abbildung 4.7: Übersicht des evolutionsbasierten Arbeitsvorbereitungsprozesses .....	90
Abbildung 4.8: Aktivitätsdiagramm zum Eingeben von Auftragsdaten .....	91
Abbildung 4.9: Datenstruktur zum Akteur Auftraggeber .....	92
Abbildung 4.10: Datenstruktur zum Akteur Auftragnehmer.....	93

Abbildung 4.11: Reduktion der geometrischen Repräsentation.....	95
Abbildung 4.12: Gefrästes Fertigungslos und Fräsbereichszugabe.....	97
Abbildung 4.13: Indikationsrepräsentation durch Kreisaggregationen .....	98
Abbildung 4.14: Symbol- und Indexsystem .....	99
Abbildung 4.15: Konvention über $x$ *, $y$ *-Koordinatensystem der Indikation.....	99
Abbildung 4.16: Fertigungslosrepräsentation mit gepackten Indikationen .....	100
Abbildung 4.17: Klassendiagramm von Indikation, Blank und Fertigungslos .....	101
Abbildung 4.18: Klassendiagramm zur Klassifikation .....	102
Abbildung 4.19: Beispiel zur Bildung von Auftragspools als Objektdiagramm.....	104
Abbildung 4.20: Drei Fälle eines Punktes in Bezug auf einen Kreis .....	106
Abbildung 4.21: Nichtüberlappingsbedingung zweier Kreise .....	107
Abbildung 4.22: Zulässige Nichtüberlappingsbedingung .....	108
Abbildung 4.23: Enthaltenseinbedingung zweier Kreise.....	109
Abbildung 4.24: Klassendiagramm zur simulierten Evolution .....	114
Abbildung 4.25: Genotyp $GI$ und dessen Phänotypen $PI$ und $PK$ .....	115
Abbildung 4.26: Präsentation des Phänotyps in Abhängigkeit des Genotyps .....	116
Abbildung 4.27: Beispiel einer Datenstruktur für Genotyp und Phänotyp .....	117
Abbildung 4.28: Erste Indikation der ersten Generation in leeren Blank packen.....	118
Abbildung 4.29: Zweite Indikation in Blank packen.....	119
Abbildung 4.30: Ausschnitt kombinatorische Bestimmung der Verschiebung $\lambda$ .....	120
Abbildung 4.31: Erster Teilschritt zur Anordnung der nächsten Indikation.....	122
Abbildung 4.32: Kreistangenten, ausgehend vom Ursprung .....	122
Abbildung 4.33: Zweiter Teilschritt zur Rotation der Indikation gemäß $\Delta\xi t2 \rightarrow 1$ ..	123
Abbildung 4.34: Dritter Teilschritt zur Translation der Indikation gemäß $\lambda_{min}$ .....	126
Abbildung 4.35: Bestimmung des Rotationswinkels $\psi$ bis zur Kollision.....	127
Abbildung 4.36: Vierter Teilschritt zur Rotation gemäß $\psi_{min}$ .....	129
Abbildung 4.37: Überschneidung eines Indikationskreises mit dem Blankrand .....	131
Abbildung 4.38: Berechnung der Fitness eines Individuums .....	133
Abbildung 4.39: Aktivitätsdiagramm zur simulierten Evolution .....	134
Abbildung 4.40: Mutations- und Rekombinationsaktivitäten im Detail .....	141
Abbildung 4.41: Rekombination von Elternmaterial zu Kindindividuen .....	142
Abbildung 4.42: Abschluss der evolutionsbasierten Arbeitsvorbereitung.....	145
Abbildung 4.43: Transformierter Phänotyp $\mathcal{P}$ für ein Werkstückmodell.....	146
Abbildung 4.44: Konsolidierte Darstellung der heuristischen Anordnungsroutine...	147
Abbildung 4.45: Grafische Darstellung der meta-heuristischen Rekombination .....	148
Abbildung 5.1: Evolutionärer Algorithmus im Rahmen eines Gesamtsystems .....	149
Abbildung 5.2: Laufzeitumgebung der Softwareplattform .NET .....	150
Abbildung 5.3: Architekturmuster MVC im Rahmen von ASP.NET.....	151
Abbildung 5.4: Systemarchitektur der prototypischen Implementierung.....	153
Abbildung 5.5: Komponenten der Webanwendung DentPool.....	155
Abbildung 5.6: SQL-Abfrage zur Erstellung der Tabellen Auftrag und Fertigungslos	156
Abbildung 5.7: Datenmodel aus dem „Entity Framework“ .....	156

Abbildung 5.8: Controller-Klasse zur Generierung von Fertigungslosen in C# .....	157
Abbildung 5.9: Ausschnitt zur grafischen Ausgabe der Fertigungslose .....	158
Abbildung 5.10: Benutzeroberfläche der Testanwendung .....	160
Abbildung 5.11: Implementierte Klassen des evolutionären Algorithmus .....	161
Abbildung 5.12: Startseite von DentPool.....	162
Abbildung 5.13: Benutzerregistrierung und -anmeldung.....	163
Abbildung 5.14: Benutzerverwaltung bei Administratorrechten.....	163
Abbildung 5.15: Aufträge manuell oder automatisiert anlegen .....	164
Abbildung 5.16: Eigene Aufträge nach Status filtern und ggf. bearbeiten .....	165
Abbildung 5.17: Anzeige aller offenen Aufträge.....	166
Abbildung 5.18: Abfrage Auftragspool und Eingabe von Evolutionsparametern.....	167
Abbildung 5.19: Ergebnis und Annahme von Fertigungslosen.....	168
Abbildung 5.20: Übersicht der eigenen Fertigungslose und enthaltenen Aufträge...	169
Abbildung 5.21: Liefertermin und Status editieren.....	170
Abbildung 5.22: Detailansicht und Herunterladen der Fertigungslosdaten .....	171
Abbildung 6.1: Struktur der Validierung .....	173
Abbildung 6.2: Übersicht bereits angelegter Testbenutzer .....	174
Abbildung 6.3: Parametrisches Kiefermodell auf Basis des Frasaco Modells AG-3...	175
Abbildung 6.4: Ableitung parametrischer Indikationsmodelle.....	175
Abbildung 6.5: Erzeugung von STL-Modellen mittels exocad.....	176
Abbildung 6.6: Ausschnitt aller offenen Aufträge .....	177
Abbildung 6.7: Eigene bereits angelegte Aufträge in der Übersicht .....	178
Abbildung 6.8: Neuen Auftrag manuell anlegen.....	179
Abbildung 6.9: Neu angelegter Auftrag unter „Eigene Aufträge“ .....	179
Abbildung 6.10: Neuer eigener Auftrag in der Übersicht „Alle offenen Aufträge“....	180
Abbildung 6.11: Abruf von Aufträgen und Start der simulierten Evolution .....	181
Abbildung 6.12: Ergebnisanzeige und Auswahl von Fertigungslosen .....	183
Abbildung 6.13: Übersicht und Herunterladen der Fertigungslosdaten .....	184
Abbildung 6.14: Ausschnitt aus XML-Datei für Fertigungslos der ID 279 .....	185
Abbildung 6.15: NC-Programmierung und Fertigung von Fertigungslos 280 .....	187
Abbildung 6.16: Statusänderung nach erfolgter Bearbeitung des Fertigungsloses...	188
Abbildung 6.17: Fitnessverläufe zur Laufzeit der simulierten Evolution.....	189
Abbildung 6.18: Überlagerung der Packskizze mit CAM-Ansicht und Fertigung.....	191
Abbildung 6.19: Lineares Laufzeitverhalten bei konstanter Problemgröße.....	192



# TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle 2.1: Aufgaben der Arbeitsablaufplanung.....	11
Tabelle 2.2: Übersicht Kreispackprobleme.....	48
Tabelle 3.1: Übersicht der Anforderungen.....	75
Tabelle 4.1: Zusammenhang der verwendeten Begriffe.....	80
Tabelle 4.2: Merkmalskorrelationen zwischen Auftrag und Betriebsmittel.....	103
Tabelle 4.3: Ableitung von Prioritätsindizes innerhalb eines Auftragspools.....	104



# ALGORITHMENVERZEICHNIS

---

Algorithmus 1: Allgemeiner evolutionärer Algorithmus .....	59
Algorithmus 2: ErsteIndikationPack(i,j):Chromosom .....	118
Algorithmus 3: ZweiteIndikationPack(i,j,Fertigunglos):Chromosom .....	122
Algorithmus 4: NächsteIndikationPack(i,j,Fertigungslos):Chromosom .....	130
Algorithmus 5: GenErsteIndividuum(Auftragspool):Individuum .....	136
Algorithmus 6: GenReplikationspool(Individuen):Replikationspool .....	138
Algorithmus 7: GenNächstesIndividuum(NächsterGenotyp,Vater):Individuum .....	143



# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

<b>.NET</b>	Software-Plattform von Microsoft
<b>0D</b>	Nulldimensional
<b>1D</b>	Eindimensional
<b>2D</b>	Zweidimensional
<b>3D</b>	Dreidimensional
<b>AJAX</b>	Asynchronous JavaScript and XML
<b>ASCII</b>	American Standard Code of Information Interchange
<b>ASP.NET</b>	Active Server Pages der .NET Softwareplattform
<b>AWF</b>	Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung
<b>B-Rep</b>	Boundary Representation
<b>BPMN</b>	Business Process Model and Notation
<b>BPP</b>	Bin Packing Problem
<b>C#</b>	Objektorientierte Programmiersprache (unterstützt .NET-Komponenten)
<b>C++</b>	Objektorientierte Programmiersprache (maschinennahe)
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CAM</b>	Computer Aided Manufacturing
<b>CANVAS</b>	Bereich zur grafischen Ausgabe von Daten in HTML
<b>CAX</b>	Computer Aided einer beliebigen Anwendungsart x
<b>CEREC</b>	Chairside Economical Restoration of Esthetic Ceramics
<b>CIL</b>	Common Intermediate Language
<b>CLDATA</b>	Cutter Location Data
<b>CLR</b>	Common Language Runtime
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>CSHTML</b>	Erzeugung von HTML auf Basis von C#
<b>CSP</b>	Cutting Stock Problem
<b>DB</b>	Datenbank

<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DNA</b>	Deoxyribonucleic Acid
<b>DNS</b>	Desoxyribonukleinsäure
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>FDI</b>	Federation Dentaire Internationale
<b>GB</b>	Gigabyte
<b>GET</b>	HTTP-Anfragemethode
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>HTML</b>	Hypertext Markup Language
<b>HTTP</b>	Hypertext Transfer Protocol
<b>IIPP</b>	Identical Item Packing Problem
<b>IIS</b>	Internet Information Services
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IP</b>	Internetprotokoll
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>JPG</b>	Joint Photographic Experts Group
<b>KBE</b>	Knowledge-based Engineering
<b>MB</b>	Megabyte
<b>MBSBPP</b>	Multiple Bin Size Bin Packing Problem
<b>MHKP</b>	Multiple Heterogeneous Knapsack Problem
<b>MHLOPP</b>	Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem
<b>MIKP</b>	Multiple Identical Knapsack Problem
<b>MILOPP</b>	Multiple Identical Large Object Placement Problem
<b>MSSCSP</b>	Multiple Stock Size Cutting Stock Problem
<b>MVC</b>	Model-View-Controller
<b>NC</b>	Numerical Control
<b>NCDATA</b>	Numerical Control Data
<b>NFP</b>	No-Fit Polygon
<b>NP</b>	Komplexitätsklasse, bei der Probleme mit einer nichtdeterministischen Turingmaschine in polynominaler Zeit gelöst werden können
<b>ODP</b>	Open Dimension Problem
<b>OK</b>	Oberkiefer
<b>P</b>	Komplexitätsklasse, bei der Probleme mit einer deterministischen Turingmaschine in polynominaler Zeit gelöst werden können

<b>PDM</b>	Produktdatenmanagement
<b>PHP</b>	Hypertext Preprocessor
<b>PMMA</b>	Polymethylmethacrylat
<b>PLZ</b>	Produktlebenszyklus
<b>POST</b>	HTTP-Anfragemethode
<b>PPS</b>	Produktionsplanung und -steuerung
<b>RBPP</b>	Residual Bin Packing Problem
<b>RCSP</b>	Residual Cutting Stock Problem
<b>REFA</b>	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
<b>ROI</b>	Return on Investment
<b>RPT</b>	Rapid Prototyping
<b>SBSBPP</b>	Single Bin Size Bin Packing Problem
<b>SLM</b>	Selective Laser Melting
<b>SLOPP</b>	Single Large Object Placement Problem
<b>SLS</b>	Selective Laser Sintering
<b>SOA</b>	Serviceorientierte Architektur
<b>SPK</b>	Single Knapsack Problem
<b>SQL</b>	Structured Query Language
<b>SSSCSP</b>	Single Stock Size Cutting Stock Problem
<b>STL</b>	Standard Triangulation Language
<b>TPD</b>	Technical Product Documentation
<b>UK</b>	Unterkiefer
<b>UML</b>	Unified Modeling Language
<b>VB</b>	Visual Basic
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>XAML</b>	Extensible Application Markup Language
<b>XML</b>	Extensible Markup Language
<b>XSD</b>	XML Schema Definition
<b>ZIP</b>	Dateiformat für verlustfrei komprimierte Dateien



# SYMBOLVERZEICHNIS

---

## Mengen

$\emptyset$	Nullmenge
A	Menge Aufträge
AG	Menge Auftraggeber
AN	Menge Auftragnehmer
BL	Menge Blanks
BMI	Menge Betriebsmittel
D	Menge Punkte kleiner Objekte
FL	Menge Fertigungslose
G	Menge Genotypen
g	Menge Lagen kleiner Objekte
G $\mathbb{O}$	Menge großer Objekte
H	Menge Zustände eines Zufallsgenerators
I	Menge Indikationen
IV	Menge Individuen
IZ	Menge Instanzen
k	Menge Kombinationsmöglichkeiten aus $X_i \times X_j$
K $\mathbb{O}$	Menge kleiner Objekte
M	Menge im Allgemeinen
N	Menge natürlicher Zahlen
P	Menge Phänotypen
Q	Menge rationaler Zahlen
R	Menge reeller Zahlen
u	Menge Positionen kleiner Objekte
X <sub>p</sub>	Menge Indizes zur Projektion kleiner und großer Objekte
X <sub>i</sub>	Menge Indizes für große Objekte $i \in \{1, 2, \dots, m\}$

- $X_j$  Menge Indizes für kleine Objekte  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$   
 $\mathbb{Z}$  Menge ganze Zahlen

## Elemente einer Menge

- $A$  Ein Auftrag  
 $AG$  Ein Auftraggeber  
 $AN$  Ein Auftragnehmer  
 $BM$  Ein Betriebsmittel  
 $BL$  Ein Blank  
 $FL$  Ein Fertigungslos  
 $I$  Eine Indikation  
 $J$  Eine Instanz  
 $IV$  Ein Individuum  
 $K$  Ein Kreis  
 $KO$  Ein kleines Objekt  
 $GO$  Ein großes Objekt

## Indizes

- $i$  Index großes Objekt  
 $j$  Index kleines Objekt  
 $k$  Index Einheit  
 $l$  Index kleines Objekt, welches ungleich zu  $j$  ist  
 $u$  Index Iteration bei Newton-Verfahren  
 $\langle x \rangle$  Index Generation  
 $\langle y \rangle$  Index Individuum  
 $\langle z \rangle$  Index Packfolge Indikation  $I$  innerhalb eines Blanks  $BL$   
' Erster Teilschritt einer heuristischen Packfunktion  
" Zweiter Teilschritt einer heuristischen Packfunktion  
''' Dritter Teilschritt einer heuristischen Packfunktion  
'''' Vierter Teilschritt einer heuristischen Packfunktion  
Bezug auf Blankkoordinatensystem  
\* Bezug auf Indikationskoordinatensystem  
~ Bezug auf Werkstückmodellkoordinatensystem

## Anzahlen

<i>b</i>	Anzahl Betriebsmittel
<i>c</i>	Anzahl Auftraggeber
<i>d</i>	Anzahl Dimensionen
<i>e</i>	Anzahl Auftragnehmer
<i>e</i>	Anzahl der Eltern
<i>E</i>	Anzahl Edges
<i>F</i>	Anzahl Faces
<i>k</i>	Anzahl der Kinder
<i>m</i>	Anzahl große Objekte
<i>n</i>	Anzahl kleine Objekte
<i>o</i>	Anzahl Einheiten in den kleinen Objekten
<i>f</i>	Anzahl Generationen
<i>g</i>	Anzahl Individuen (pro Generation)
<i>H</i>	Anzahl Holes
<i>h</i>	Anzahl Indikationen <i>I</i> pro Blank <i>BL</i>
<i>R</i>	Anzahl Rings
<i>S</i>	Anzahl Shells
<i>s</i>	Anzahl selektierter Individuen
<i>V</i>	Anzahl Vertices
<i>v</i>	Anzahl Übertragung von Individuen an die nächste Generation
<i>w</i>	Anzahl zu rekombinierenden Individuen

## Sonstige lateinische Schriftzeichen

*Schrifttyp 1 – Große lateinische Schriftzeichen*

<i>G</i>	Gen
<i>IS</i>	Indexselektion
<i>L</i>	Länge großes Objekt
<i>M</i>	Manipulationsmatrix kombiniert aus Translation und Rotation
<i>P</i>	Population
<i>R</i>	Rotationsmatrix
<i>T</i>	Transformationsmatrix

*Schrifttyp 1 – Kleine lateinische Schriftzeichen*

$a$	Fläche
$dec$	Decodierungsfunktion
$fa$	Face
$l$	Länge kleines Objekt
$lo$	Loop
$m_K$	Steigung Kreistangente
$no$	Normale
$p$	Komponente $p$ der $p$ - $q$ -Formel
$p_0$	Parameter
$p_{Mut}$	Mutationswahrscheinlichkeit
$p_{Rek}$	Rekombinationswahrscheinlichkeit
$q$	Komponente $q$ der $p$ - $q$ -Formel
$r$	Radius
$sh$	Shell
$s_{ver}$	Verschnittschwelle
$t$	Tangente
$u$	Position kleines Objekt/Indikation (bezogen auf Blankkoordinatensystem)
$v$	Position Einheit/Kreis (bezogen auf Indikationskoordinatensystem)
$ve$	Vertex
$w$	Position Einheit/Kreis (bezogen auf Blankkoordinatensystem)
$x$	Koordinatenachse $x$ (im Blankkoordinatensystem)
$y$	Koordinatenachse $y$ (im Blankkoordinatensystem)
$z$	Koordinatenachse $z$ (im Blankkoordinatensystem)
$z_{Mut}$	Zufallszahl zur Mutation

*Schrifttyp 2 – Große lateinische Schriftzeichen*

$\mathcal{A}$	Basis einer Potenz
$\mathcal{D}$	Determinante
$\mathcal{F}$	Gesamtfitness
$\mathcal{G}$	Genotyp
$\mathcal{G}_I$	Genotyp Indikation
$\mathcal{H}$	Klassifikationsmerkmal Höhe
$\mathcal{K}$	Exponent einer Potenz
$\mathcal{M}$	Klassifikationsmerkmal Material

$\mathcal{N}$	Problemgröße
$\mathcal{O}$	Ordnung eines Problems
$\mathcal{P}$	Phänotyp
$\hat{\mathcal{P}}$	Phänotyp transformiert für Werkstückmodell
$\mathcal{P}_{FL}$	Phänotyp Fertigungslos
$\mathcal{P}_I$	Phänotyp Indikation
$\mathcal{P}_K$	Phänotyp Kreis
$\mathcal{Q}$	Klassifikationsmerkmal Qualitätsstufe
$\mathcal{R}$	Radikant
$\mathcal{T}$	Traglast
$\mathcal{V}$	Klassifikationsmerkmal Fertigungsverfahren
$\mathcal{W}$	Gewicht

*Schrifttyp 2 – Kleine lateinische Schriftzeichen*

$a$	Anordnungsrestriktion
$b$	Bedarfszahl
$c$	Nutzwert kleiner oder großer Objekte
$f$	Einzelfitness
$g$	Gewichtungsfaktor Fitness
$h$	Kombination zwischen einem kleinen und einem großen Objekt
$m$	Mittelpunkt
$\sigma$	Anordnungsvariante
$p$	Priorität
$s$	Entfernung
$t$	Wartedauer
$z$	Ganzzahlige Zählvariable

## Sonstige griechische Schriftzeichen

### *Kleine griechische Schriftzeichen*

$\alpha$	Lagewinkel kleines Objekt um Koordinatenachse $x$
$\beta$	Lagewinkel kleines Objekt um Koordinatenachse $y$
$\gamma$	Lagewinkel kleines Objekt um Koordinatenachse $z$
$\delta$	Euklidischer Abstand
$\eta$	Winkel Schnittfläche zweier überlappender Kreise
$\vartheta$	Abstand Schnittebene zweier überlappender Kreise
$\lambda$	Verschiebeskalar
$\xi$	Winkel Kreistangente
$\varphi$	Lagewinkel Positionsvektor $u$ (im Blankkoordinatensystem)
$\phi$	Phi-Funktion unter der Enthaltenseinbedingung
$\chi$	Fräsbereichszugabe
$\psi$	Winkel Rotation bis Kollision

### *Große griechische Schriftzeichen*

$\Gamma$	Winkelbereich von $\gamma$
$\Delta$	Differenz
$\Xi$	Zustand als Ergebnis eines Zufallsgenerators
$\Pi$	Optimierungsproblem
$\Phi$	Phi-Funktion unter der Nichtüberlappungsbedingung
$\Omega$	Suchraum zulässiger Lösungen