

Tan Nguyen Dang

Entwicklung eines effizienten Montageplanungssystems auf Basis von Funktionsfolgen

**Wissenschaftliche Schriftenreihe der
CHEMNITZER MONTAGE- UND HANDHABUNGSTECHNIK
Band 5**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger (Hrsg.)

Tan Nguyen Dang

**Entwicklung eines effizienten Montageplanungssystems
auf Basis von Funktionsfolgen**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

**Universitätsverlag Chemnitz
2019**

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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



Das Werk - ausgenommen Zitate, Cover, Logo TU Chemnitz und Bildmaterial im Text - steht unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Titelgrafik: Tan Nguyen Dang
Satz/Layout: Tan Nguyen Dang

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<https://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

readbox unipress
in der readbox publishing GmbH
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
<http://unipress.readbox.net>

ISSN 2364-4400 (Druck) - ISSN 2364-4419 (Online)

ISBN 978-3-96100-089-0

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-335515>



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

**Entwicklung eines effizienten Montageplanungssystems
auf Basis von Funktionsfolgen**

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

Genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von: Tan Nguyen Dang, Master of Engineering
geboren am: 01.04.1979 in Hanoi
eingereicht am: 17.10.2018
verteidigt am: 01.03.2019

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger
Prof. Dr.-Ing. Jörg Matthes

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Promotionsstudent an der Professur Montage und Handhabungstechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Berger, Inhaber der Professur Montage- und Handhabungstechnik. Seine fachliche und persönliche Unterstützung, verbunden mit seiner Diskussionsbereitschaft, bilden eine fundamentale Grundlage dieser Arbeit.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Matthes, Inhaber der Professur Maschinenelemente, an der Hochschule Mittweida. Sein Koreferat sowie zahlreiche, fachliche Anregungen zu meinen Untersuchungen brachten mich stetig voran.

In gleichem Maße danke ich meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Carsten Teichgräber für seine Unterstützung in den Programmen PTC Creo und Mathcad, und Herrn Dipl.-Ing. Christian Hulsch für seinen herzlichen Empfang in Chemnitz. Gleichwohl gilt mein Dank den Herren Dr.-Ing. Daniel Denninger und Dr.-Ing. Andreas Heine. Ihr Beistand beim Erlernen der deutschen Sprache und dem Einstieg in die wissenschaftliche Arbeitsweise bilden den Rahmen meiner Forschungsarbeit in Chemnitz.

Schließlich möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Promotionsstudenten der Professur für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung in einer kollegialen Atmosphäre bedanken. Insbesondere gilt dabei mein Dank Herrn B. Sc. Mike Männel, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ein weiteres Wort des Dankes gilt ferner Herrn M.Sc. Nguyễn Tuấn Khải für seine Hinweise im Bereich der linearen Optimierung.

Herzlichst danke ich meiner Frau Phạm Thị Diệu Hằng und meiner Tochter Nguyễn Cẩm Tú sowie meinen Eltern. Sie ermöglichten meinen Forschungsaufenthalt und sorgten, trotz der großen Entfernung und der langen Abwesenheit, immer für mein seelisches Gleichgewicht.

Abschließend gilt mein Dank auch meiner restlichen Familie sowie allen Freunden, die stets an meiner Seite waren und sind.

Chemnitz, Oktober 2018

Tan Nguyen Dang

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Bezeichnungen	XIII
Abbildungsverzeichnis	XIX
Tabellenverzeichnis	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung.....	6
2 Stand der Technik	9
2.1 Montage- und Handhabungstechnik	9
2.1.1 Einordnung in den Wertschöpfungsprozess	9
2.1.2 Begriffliche Zuordnung und Definitionen.....	12
2.1.3 Gliederung von Montagesystemen.....	15
2.2 Symbolische Beschreibung von Montagesystem	17
2.2.1 Analyse und formale Beschreibung von Funktionen	17
2.2.2 Symbole zur Beschreibung eines Montagesystems.....	18
2.2.3 Aufbau einer Funktionsfolge	22
2.3 Planung von Montagesystemen	26
2.3.1 Methodische Planung.....	26
2.3.2 Auswahl von Funktionsträgern	29
2.4 Taktzeit einer automatischen Montageanlage	31
2.4.1 Taktzeitermittlung einer Station.....	31
2.4.2 Minimierung der Taktzeit von Anlagen.....	33
2.5 Methoden der linearen Optimierung	38

2.5.1	Mathematische Formulierung.....	38
2.5.2	Lösungsverfahren.....	42
3	Präzisierung der Aufgabenstellung	47
3.1	Analyse der methodischen Planung	47
3.2	Potential bei der Planung von Montagesystemen.....	49
3.3	Lösungsansatz eines Montageplanungssystems	53
4	Entwicklung der neuen Symbolsprache	57
4.1	Konkretisierung und Erweiterung bekannter Funktionen.....	57
4.1.1	Funktionssymbole für Werkstücke und Werkzeuge.....	57
4.1.2	Kombinationssymbolen "Werkstücke und Funktionsträger"	58
4.2	Entwicklung neuer parametrische Symbole	61
4.2.1	Funktionalitäten und Anforderungen der neuen Symbole.....	61
4.2.2	Parameteridentifikationen	62
4.2.3	Aufbau und Umsetzung der Symbolsprache	65
4.3	Implementierung der Parameter	68
4.3.1	Position und Orientierung eines Körpers im Raum.....	68
4.3.2	Gestaltung der 3D-Symbolen	71
4.4	Rechnergestützte Umsetzung der Symbolsprache.....	74
4.4.1	Parametrische Symbole	74
4.4.2	Ortswechselplan	77
5	Umsetzung des neuen Montageplanungssystems.....	79
5.1	Grobplanung eines Montagesystems.....	79
5.1.1	Ermittlung von Funktionen	79
5.1.2	Aufteilung der Arbeitsinhalte	81
5.2	Feinplanung des Montagesystems.....	84
5.2.1	Suche der Funktionsträger.....	84

5.2.2	Erstellung der Funktionsfolge mit parametrischen Symbolen	87
5.3	Minimale Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten.....	91
5.3.1	Aufgabenstellung	91
5.3.2	Methodische Gesichtspunkte	92
5.3.3	Algorithmus zum Lösen des Optimierungsproblems.....	101
6	Anwendungsbeispiel "Chiphalter"	105
6.1	Aufgabenstellung	105
6.2	Grobplanung	106
6.2.1	Ermittlung der Funktionen.....	106
6.2.2	Aufstellung der Funktionsfolgen.....	108
6.2.3	Darstellung der Positionen und Orientierungen von Werkstücken	111
6.3	Feinplanung	115
6.3.1	Funktion Zuteilen.....	115
6.3.2	Gruppe "Spannen-Verschieben-Entspannen"	117
6.3.3	Funktion Schwenken.....	122
6.4	Auswahl der Funktionsträgervarianten	125
6.4.1	Erstellung der Weg-Schritt-Diagramme.....	125
6.4.2	Standardform des Optimierungsproblems.....	133
6.4.3	Gestaltung des Programms in CPLEX und Ergebnisse.....	138
6.5	Konstruktive Umsetzung.....	145
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	149
8	Literaturverzeichnis.....	151
8.1	Schriften und Bücher	151
8.2	Normen, Richtlinien und Patente	159
8.3	Onlinequellen	160

9	Anhang	165
9.1	Zusammenstellung der Symbole	165
9.1.1	Handhabungssymbole nach VDI 2860.....	165
9.1.2	Neue Handhabungssymbole.....	172
9.1.3	Neue Symbole zur Ermittlung der Funktionsträger (Werkzeuge).....	174
9.1.4	Parametrische Symbole	193
9.2	Beispielhafte Konfiguration eines Montagesystems	199
9.3	Primale Simplexmethode in vektorieller Form	206
9.4	Berechnung der Verfahrzeiten.....	212
9.5	Erstellung der Funktionsfolgen von Station 2 bis Station 5	216
9.5.1	Station 2: Einsetzhandling für Chip	216
9.5.2	Station 3: Einsetzhandling für Buchse	218
9.5.3	Station 4: Prüfvorrichtung.....	220
9.5.4	Station 5: Auswurfstation.....	220
9.6	Funktionsträger des Rundtaktautomaten	223
9.6.1	Datenbank der Station 1	223
9.6.2	Datenbank der Station 2	228
9.6.3	Datenbank der Station 3	232
9.6.4	Datenbank der Station 4	235
9.6.5	Datenbank der Station 5	237

Bezeichnungen

Abkürzung	Bedeutung
A, E	Ausgangsgrößen, Eingangsgrößen
AWBG	Anwesenheit prüfen des Chips in dem Chiphalter
BG	Baugruppe
BKS	Bezugskoordinatensystem (x, y, z)
Bsp.	Beispiel
BT	Bauteil
CPLEX	IBM ILOG CPLEX Optimization Studio
DIN	Deutsches Institut für Normung
E_1, E_2	Ergebnis 1, 2
FT	Funktionsträger
FTL	Funktionsträgerliste
FTV	Funktionsträgervariante
GFBG	Baugruppe spannen / entspannen
GFBU	Buchse spannen / entspannen
GFCH	Chip spannen / entspannen
GFCT	Chiphalter spannen / entspannen
HSBG	Baugruppe Horizontalverschieben
HSBU	Buchse Horizontalverschieben
HSCH	Chip Horizontalverschieben
HSCT	Chiphalter Horizontalverschieben

i.O.	in Ordnung
KKS	körpereigenes Koordinatensystem (u, v, w)
MTM	Methods Time Measurement
n.i.O.	nicht in Ordnung
OPL	Optimization Program Language
RST	Rundschtalttisch
St.	Station
Stk.	Stück
SvZ	System vorbestimmter Zeiten
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VLF	Vibrationslinearförderer
VNCT	Vertikalschlitten spannen / entspannen
VSBG	Baugruppe Vertikalverschieben
VSBU	Buchse Vertikalverschieben
VSCH	Chip Vertikalverschieben
VSCT	Chiphalter Vertikalverschieben
VWF	Vibrationswendelförderer
WST	Werkstück
WT	Werkstückträger
ZTBU	Buchse zuteilen
ZTCH	Chip zuteilen
ZTCT	Chiphalter zuteilen

Kurzzeichen	Einheit	Benennung
$\vec{p}_i^{(j)}$ $= [x_i^{(j)}, y_i^{(j)}, z_i^{(j)}]^T$	[-]	Position i eines Körpers j in Bezug auf das BKS
$u_i^{(j)}, v_i^{(j)}, w_i^{(j)}$	[-]	körpereigenes Koordinatensystem eines Körpers j in einer Position i
(S) Px; Py; Pz	[mm]	Startposition eines Körpers im Vergleich mit BKS
(E) Px; Py; Pz	[mm]	Endposition eines Körpers im Vergleich mit BKS
Rotation $R(wu'w'', \alpha, \beta, \gamma)$	[°]	Drehung eines Körpers um $w-$, $u-$, $w -$ Achse mit dem Winkel α, β, γ
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	[mm]	Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Position nach $x-, y-, z -$ Achse
t_{Start}	[s]	Startzeit einer Funktion
t_{Dauer}	[s]	Dauerzeit einer Funktion
t_{Start}^A	[s]	Startzeit einer Handhabungsfunktion "A"
t_{Dauer}^A	[s]	Ausführungszeit einer Handhabungsfunktion "A"
T	[s]	Taktzeit des Montagesystems

T_σ	[s]	Taktzeit einer Station $\sigma \in \mathbb{N}_+$
T_1, \dots, T_5	[s]	Taktzeiten der Stationen 1 bis 5
T^*	[s]	Taktzeitwert des Montagesystems
T_{max}, T_{min}	[s]	maximale, minimale Taktzeit der Stationen eines Montagesystems
\mathbb{S}	[-]	Menge aller Stationen des gesamten Montagesystems
\mathbb{F}_σ	[-]	Menge aller Funktionsträger der Station σ
$\mathbb{F}_1, \dots, \mathbb{F}_5$	[-]	Die Mengen der Funktionsträger des Rundtaktautomaten von Station 1 bis Station 5
Δ_κ^σ	[-]	Menge der Änderungspunkte im Weg-Schritt-Diagramm des Funktionsträgers $\kappa \in \mathbb{F}_\sigma$ in der Station σ
$t_{\kappa, \delta}^\sigma$	[s]	Zeitpunkt entsprechend der Zustandsänderung $\delta \in \Delta_\kappa^\sigma$ eines Funktionsträgers κ in der Station σ
$t_{\kappa, p}^{\sigma_{START}}, t_{\kappa, p}^{\sigma_{ENDE}}$	[s]	Start-, Endzeitpunkt einer Bewegung eines Funktionsträgers κ in der Station σ entsprechend einer Ausführung p
Γ_κ	[-]	Menge aller FTV des Funktionsträgers $\kappa \in \bigcup_{\sigma \in \mathbb{S}} \mathbb{F}_\sigma$

$\lambda_{\kappa,v}^{\sigma}$	[-]	binäre Variable = 0 oder 1, das bedeutet, ob eine FTV v in der FTL eines Funktionsträgers κ in der Station σ ausgewählt wird.
$\mathbb{P}_{\kappa}^{\sigma}$	[-]	Menge aller Ausführungen/Prozesse des Funktionsträgers κ der Station σ . Es ist zu beachten, dass $\forall p \in \mathbb{P}_{\kappa}^{\sigma}: \{p_{\text{START}}, p_{\text{ENDE}}\} \subset \Delta_{\kappa}^{\sigma}$.
τ_v^p	[s]	Katalogparameter, der die Nennausführungszeit der Ausführung p der FTV v des Funktionsträgers $\kappa \in \mathbb{F}_{\sigma}$ in der Station σ darstellt.
c_v	[€]	Anschaffungskosten einer FTV v des Funktionsträgers $\kappa \in \mathbb{F}_{\sigma}$ in der Station σ
C_{GESAMT}	[€]	Gesamtanschaffungskosten des Montagesystems
C_{GESAMT}^*	[€]	vorgegebenen Werte der Gesamtanschaffungskosten
J	[kgm ²]	Massenträgheitsmoment
t_s	[s]	Schrittzeit des Rundschalttisches
t	[s]	Zeit
S	[m]	Weg
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_m	[m/s]	mittlere Kolbengeschwindigkeit
a	[m/s ²]	Beschleunigung

v_{max}	[m/s]	maximale Geschwindigkeit einer Linearachse
$[v_{max}]$	[m/s]	zulässige maximale Geschwindigkeit einer Linearachse
a_{max}	[m/s ²]	maximale Beschleunigung einer Linearachse
$[a_{max}]$	[m/s ²]	zulässige maximale Beschleunigung einer Linearachse
F_R	[N]	Reibungskraft
F_A	[N]	Antriebskraft
F_G	[N]	Greifkraft
μ	[-]	Haftreibungskoeffizient
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
m	[kg]	Gewicht
S_v	[-]	Sicherheitsfaktor eines Linearmoduls oder einer Linearachse
S_f	[-]	Sicherheitsfaktor eines Greifers

Alle hier nicht aufgeführten Bezeichnungen und Kurzzeichen sind an den entsprechenden Textstellen näher erläutert.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Fließbandproduktion des Modell T [Han17]	1
Abb. 1.2:	Montage der Front- und Heckscheibe durch Roboter [Por17]	2
Abb. 1.3:	Schematische Darstellung eines Rundtaktautomaten	3
Abb. 1.4:	Beispiel einer symbolischen Funktionsfolge	4
Abb. 2.1:	Einordnung der Montage und Produktion [Zie08].....	10
Abb. 2.2:	Montagefunktionen in Anlehnung an DIN 8593 und VDI 2860	12
Abb. 2.3:	Auswahlkriterien für Montagesysteme nach [Kon03], [Ric84], [Lot12].....	14
Abb. 2.4:	Gliederung von Montagesystemen nach [Hes93].....	16
Abb. 2.5:	Funktionsbeschreibung mit Eingangs- und Ausgangsgrößen [Fel13], [Con13]	17
Abb. 2.6:	Funktionsfolge mit symbolischer Darstellung [Ehr13].....	19
Abb. 2.7:	Handhabungssymbole im Einsatz von Vakuum [Fes17]	22
Abb. 2.8:	Funktionsfolge einer Station des Rundtaktautomaten	22
Abb. 2.9:	Chiphalterzuführung und Einsetzhandling	23
Abb. 2.10:	Ablauf einer Montageplanung [Spi14]	26
Abb. 2.11:	Einflussfaktoren für die Baukastenauswahl [Hes93].....	30
Abb. 2.12:	Beispielhaftes Weg-Zeit-Diagramm der Station 1.....	33
Abb. 2.13:	Taktzeitdiagramm einer Montageanlage	34
Abb. 2.14:	Taktzeit und Anschaffungskosten von Linearmodule im Vergleich [Goe04].....	37
Abb. 2.15:	Untergliederung der Optimierung [Cav13].....	38

Abb. 2.16:	graphisches Lösungsverfahren [Ung10]	43
Abb. 2.17:	graphische Lösung des linearen Optimierungsproblems	44
Abb. 3.1:	Verbesserungspotential der bekannten Planungsmethodik...	50
Abb. 3.2:	Lösungsansatz für ein neues Montageplanungssystem.....	54
Abb. 4.1:	Symbole für die Funktionsträger (Bilder nach [Hes13]).....	58
Abb. 4.2:	Eine Kombinationsmöglichkeit zur Realisierung einer Handhabungsfunktion	59
Abb. 4.3:	Beispielhafte Funktionsfolge für eine Zylinderstiftzuführung	59
Abb. 4.4:	Morphologischer Kasten mit Variantenbildung.....	60
Abb. 4.5:	Funktionsfolge mit symbolischen Darstellung für Werkzeuge (vgl. Abb. 4.3)	60
Abb. 4.6:	Aufbau eines Symbolbausteins	61
Abb. 4.7:	Eingangs- und Ausgangsparameter des neuen Funktionssymbols	63
Abb. 4.8:	Parameteridentifikation am Beispiel für Funktion "Zuteilen"	65
Abb. 4.9:	Schnittstelle einer Funktionsfolge.....	66
Abb. 4.10:	parametrisches Symbol "Zuteilen"	67
Abb. 4.11:	Festlegung des körpereigenen Koordinatensystems	69
Abb. 4.12:	Bezugskoordinatensystem und körpereigenes Koordinatensystem	70
Abb. 4.13:	Rotation um die x-, y- und z-Achse [Lin16].....	71
Abb. 4.14:	Darstellung der Bewegungen eines Körpers im Raum durch 3D-Symbole.....	73

Abb. 4.15:	Schritte zur Erstellung eines parametrischen Symbols und Bibliothek	75
Abb. 4.16:	Symbolischen Bibliothek zur Erstellung einer Funktionsfolge	76
Abb. 4.17:	Verknüpfung der Variante mit Ausführungsvariante (Bild [Sch17])	76
Abb. 4.18:	Beispiel einer Funktionsfolge mit 3D-Symbolen	77
Abb. 4.19:	Erstellung eines Ortswechselflans durch Computersoftware "3D-Builder"	78
Abb. 5.1:	Anordnung der Montagestationen in Bezug auf die Funktionsfolge	80
Abb. 5.2:	Beispielhafte Funktionsfolge mit den Ausführungszeiten	80
Abb. 5.3:	Aufteilung der Arbeitsinhalte in einer Reihenverkettung	82
Abb. 5.4:	Aufteilung der Arbeitsinhalte in einer Parallelverkettung	83
Abb. 5.5:	Aufteilung der Arbeitsinhalte in einer Reihen-Parallel-Verkettung	83
Abb. 5.6	Allgemeine Schritte zur Suche der Funktionsträgervarianten	85
Abb. 5.7:	automatische Erfüllung der Zeitdauer und Kosten	88
Abb. 5.8:	Funktionsfolge mit parametrischen Symbolen	89
Abb. 5.9:	Beispielhaftes Balkendiagramm von Ausführungszeiten und Anschaffungskosten	90
Abb. 5.10:	Auswahlmöglichkeiten der Varianten zum Aufbau einer Montageanlage	91
Abb. 5.11:	Weg-Schritt-Diagramm einer Station	93

Abb. 5.12:	Gliederung von Datenbank eines Montagesystems in MS Access	93
Abb. 5.13:	Unterschiede zwischen der Stufe 1 und 2	99
Abb. 5.14:	Beispiel für ein Taktzeit-Kosten-Diagramm	100
Abb. 5.15:	Algorithmus zur Minimierung der Taktzeit und Anschaffungskosten	102
Abb. 5.16:	Ausgeben der Optimierungsergebnisse von Stufe 1 in einer Tabelle	103
Abb. 5.17:	Beispielhafte Ergebnisse des Optimierungsproblems	103
Abb. 6.1:	Formen und Maße von Buchse, Chip und Chiphalter	105
Abb. 6.2:	Anordnung nach dem Ordnen	107
Abb. 6.3:	Funktionsfolge der Station 1	109
Abb. 6.4:	Beispiel für eine Gestaltung der Station 1	110
Abb. 6.5:	Ausgangssituationen der KKS von Chiphalter, Chip und Buchse	111
Abb. 6.6:	Orientierungen von Chiphalter, Chip und Buchse nach dem Ordnen	112
Abb. 6.7:	Ortswechselplan des Rundtaktautomaten	114
Abb. 6.8:	Parameteridentifikation für die Zuteilung des Chiphalters	115
Abb. 6.9:	Stapelmagazin mit Schieberzuteiler für die Zuteilung des Chiphalters	116
Abb. 6.10:	Parameteridentifikation für das Spannen-Verschieben-Entspannen	118
Abb. 6.11:	Kombination Spannen-Verschieben und der Greifkraftbestimmung	118
Abb. 6.12:	Parameteridentifikation für Chiphalter Schwenken	123

Abb. 6.13:	Aufbauteller des Rundschalttisches	123
Abb. 6.14:	Weg-Schritt-Diagramm der Station 1	125
Abb. 6.15:	Weg-Schritt-Diagramm der Station 2	128
Abb. 6.16:	Weg-Schritt-Diagramm der Station 3	130
Abb. 6.17:	Weg-Schritt-Diagramm der Station 4	130
Abb. 6.18:	Weg-Schritt-Diagramm der Station 5	132
Abb. 6.19:	Gliederung des Optimierungsprogramms	139
Abb. 6.20:	Unterschiedliche Ergebnisse zwischen der Stufe 1 und Stufe 2	140
Abb. 6.21:	Weg-Zeit-Diagramm entsprechend der Stufe 1 und Stufe 2	141
Abb. 6.22:	Taktzeit - Kosten des Rundtaktautomaten	142
Abb. 6.23:	Zeit-Schritt-Diagramm mit der Taktzeit $T = 0,89$ s	144
Abb. 6.24:	Wesentliche Verbindungselemente [Sch17], [Sim17]	145
Abb. 6.25:	Konstruktion der Rundtaktautomaten	147
Abb. 9.1:	Vergleich zweier zusammengesetzter Funktionen: "Ordnen" [VDI2860] und "2D-Pick & Place"	172
Abb. 9.2:	kombinierte Translationen und Rotationen	173
Abb. 9.3	Antriebswelle des Kegelradgetriebes [SEW17]	199
Abb. 9.4:	Fügerangfolge zur montierten Antriebswelle mit Gehäuse	202
Abb. 9.5:	Allgemeine Gesamtfunktionsfolge der Montage der Antriebswelle	204
Abb. 9.6:	Fügen der Außenringe Nr. 5 und 8 zum Basisteil	205
Abb. 9.7:	Reihenfolgestufen der primalen Simplexmethode [Van08]	206

Abb. 9.8:	Diagramm der linearen Bewegungsprofile [Bra14]	213
Abb. 9.9:	Veränderung der Rastzeit durch elektrische Steuerung	215
Abb. 9.10:	Funktionsfolge der Station 2	216
Abb. 9.11:	Beispiel für eine Gestaltung der Station 2	217
Abb. 9.12:	Funktionsfolge der Station 3	218
Abb. 9.13:	Beispiel für eine Gestaltung der Station 3	219
Abb. 9.14:	Funktionsfolge und ein Beispiel für eine Gestaltung der Station 4	220
Abb. 9.15:	Funktionsfolge der Station 5	221
Abb. 9.16:	Beispiel für eine Gestaltung der Station 5	222
Abb. 9.17:	Chips Zuteilen	228
Abb. 9.18:	Kombination Spannen-Verschieben und der Greifkraftbestimmung	228
Abb. 9.19:	Ermittlung der Greifkraft F_G von Buchse	233
Abb. 9.20:	Kombination Linearachse, Linearmodul und 2-Backengreifer	237

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Montagesystems [Wei14], [Spu14]	18
Tabelle 2.2: Materialflusssymbole [VDI3300].....	20
Tabelle 2.3: Grundsymbol für Handhabungs- und Fertigungsaufgaben [VDI2860].....	20
Tabelle 2.4: Zusammenstellung von Funktionsfolgen [VDI 2860].....	24
Tabelle 2.5: Eingangsparameter für Optimierungsaufgabe	41
Tabelle 3.1: Möglichkeiten und Schwachstellen der bekannten Methode.....	48
Tabelle 4.1: Allgemeine Parameter für Funktionen.....	64
Tabelle 4.2: Einordnung der 3D-Symbole.....	72
Tabelle 5.1: Technische Lösungen für Vertikalschlitten mit einem Hub von 80 mm	86
Tabelle 6.1: Merkmale von Buchse, Chip und Chiphalter.....	106
Tabelle 6.2: geschätzte Verfahrzeiten auf Station 1	109
Tabelle 6.3: Anforderungsliste und Funktionsträger für die Zuteilung des Chiphalters.....	117
Tabelle 6.4: Anforderungsliste und Funktionsträger für Chiphalter-Greifen.....	120
Tabelle 6.5: Anforderungsliste und Funktionsträger für das Vertikalverschieben	121
Tabelle 6.6: Anforderungsliste und Funktionsträger für das Horizontalverschieben	122

Tabelle 6.7: Anforderungsliste und Rundsaltischvarianten.....	124
Tabelle 6.8: Sensoren verwendeter Stationen	148
Tabelle 9.1: Anlehnung an die Symbole nach VDI 2860	166
Tabelle 9.2: Neue Symbole für zur Pick & Place - Handhabung.....	173
Tabelle 9.3: Symbolische Darstellungen für die Werkstückhandhabung und Funktionsträger	175
Tabelle 9.4: Liste der parametrischen Symbole.....	195
Tabelle 9.5: Eigenschaften der Bauteile von Antriebswelle	200
Tabelle 9.6: Beispielhafte Mittlere Geschwindigkeit von pneumatischen Linearmodulen	212
Tabelle 9.7: Beispielhafte max. Geschwindigkeit und Beschleunigung der Linearachsen	214
Tabelle 9.8: geschätzte Ausführungszeiten auf Station 2	217
Tabelle 9.9: geschätzte Ausführungszeiten auf Station 3	219
Tabelle 9.10: geschätzte Ausführungszeiten auf Station 5	221
Tabelle 9.11: Linearmodule für Chiphalter zuteilen [Sch17], [Zim17], [Nor17], [Dom17].....	223
Tabelle 9.12: Greifer für Chiphalter spannen [Sch17], [Fes17], [SMC17]	224
Tabelle 9.13: Linearmodule für Chiphalter Vertikalverschieben [Dom17], [Sch17], [Zim17], [Afa17], [Nor17].....	225
Tabelle 9.14: Linearmodule für Chiphalter Horizontalverschieben [Fes17], [Afa17], [Zim17]	226
Tabelle 9.15: Rundsaltische [Tak17], [Hei17], [Wei17].....	227
Tabelle 9.16: Greifer für Chips spannen [Sch17], [Zip17], [Fes17].....	230

Tabelle 9.17: Linearmodule für Chips Horizontalverschieben [Sch17], [Nor17], [Dom17], [Afa17], [Fes17]	231
Tabelle 9.18: Linearmodule für Buchsen zuteilen [Sch17], [Nor17], [Dom17].....	232
Tabelle 9.19: Greifer für Buchsen Spannen [Sch17].....	235
Tabelle 9.20: Linearmodule für Vertikalschlitten [Sch17].....	236
Tabelle 9.21: Linearachse für Horizontalschlitten [Dom17], [Sch17], [Rex17]	238

1 Einleitung

1.1 Motivation

Bereits in den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wusste Henry Ford: *"Zeitverschwendung ist die leichteste aller Verschwendungen"*. Als Gründer der Ford Motor Company entwickelte und perfektionierte er unter anderem kontinuierlich die Fließbandfertigung seiner Automobile. Beispielsweise wurde das Ford Modell T als erstes Automobil nach dem Fließprinzip hergestellt (s. **Abb. 1.1**). Mit dieser effektiven Produktionsweise gelang es ihm, die steigende Nachfrage bei gleichbleibenden Qualitätsansprüchen zu decken und 15 Mio. Stück der sogenannten "Blechliesel" zu fertigen. Ein wichtiger Beitrag zur industriellen Revolution durch die Verbesserung von Produktions- und Montageprozessen war geleistet.



Abb. 1.1: Fließbandproduktion des Modell T [Han17]

Vor allem durch die Einführung dieser und vieler weiterer, zumeist getakteter, Produktionsprozesse wird der Systematisierung und Standardisierung von Arbeitsschritten eine enorme Bedeutung zuteil. Besonders die Reduktion der Taktzeit und die einhergehende Erhöhung der Taktrate ist unter wirtschaftlichen Aspekten die wichtigste Stellschraube in ressourceneffizienten Produktions- und Montageprozessen. Während bei der Produktion von Fahrzeugen, Werkzeugmaschinen oder anderen komplexen Baugruppen auf manuelle Bearbeitungsschritte noch nicht verzichtet werden kann, kommt es bei konventionellen Verpackungs-, Fertigungs- oder Montageprozessen bereits

zur vollständigen Automatisierung. Dabei werden die einzelnen Objekte, Werkstücke oder Güter den Bearbeitungsstationen bedarfsgerecht zugeführt und verarbeitet. Bis heute wird die Automatisierung derartiger Montageprozesse vorangetrieben und Funktionsträger kontinuierlich weiterentwickelt.

Bei manuellen oder hybriden Montagesystemen findet im Wesentlichen ein gleichwertiger Austausch der Anlagenkomponenten in Form der integrierten Bearbeitungsstationen oder der eingesetzten Transportsysteme statt. Beispielsweise werden mechanisierte Werkzeuge oder Fließbandsysteme durch neue, leistungsstärkere Komponenten ersetzt. In vollautomatisierten Montagesystemen kommen ebenfalls stetig neue Komponenten zum Einsatz. Mit steigendem Automatisierungsgrad steigt auch die Bedeutung einer effizienten Montage- sowie Anlagenplanung im Vorfeld der physischen Entwicklung von Montagesystemen. Eine intelligente Montageplanung basiert auf einer eindeutig definierten Funktionsfolge zur Handhabung der notwendigen Objekte, Werkstücke oder Güter und deren Montage bzw. Zusammenstellung zu einem fertigen Produkt. Darauf aufbauend können Funktionsträger ausgewählt und optimal angeordnet werden, um Totzeiten im Produktionsprozess zu vermeiden und dadurch die Taktrate zu erhöhen. Zur Verknüpfung der einzelnen Komponenten kommen in der Regel Zuführeinrichtungen und speziell ausgerüstete Roboter zum Einsatz [Lot12]. In modernen Produktionslinien übernehmen beispielsweise Roboter die Aufgabe von schweren, monotonen oder auch gefährlichen Arbeiten (s. **Abb. 1.2**).



Abb. 1.2: Montage der Front- und Heckscheibe durch Roboter [Por17]

Mit der VDI 2860 Blatt 1 "Montage- und Handhabungstechnik" wurden im Oktober 1982 Anhaltspunkte in Form von Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen und deren Verknüpfungen für den Entwurf von automatisierten Montagesystemen ausgegeben. Dieses Dokument wurde im Jahr 1990 durch eine überarbeitete und verbesserte Version ersetzt. Die VDI 2860 beschreibt die Begriffe der Handhabungstechnik und definiert und symbolisiert die Handhabungsfunktionen. Bis zum Abgabetermin der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wurde die genannte Richtlinie weder verbessert noch ersetzt und aufgrund der fehlenden Pflege am 29. Februar 2016 zurückgezogen.

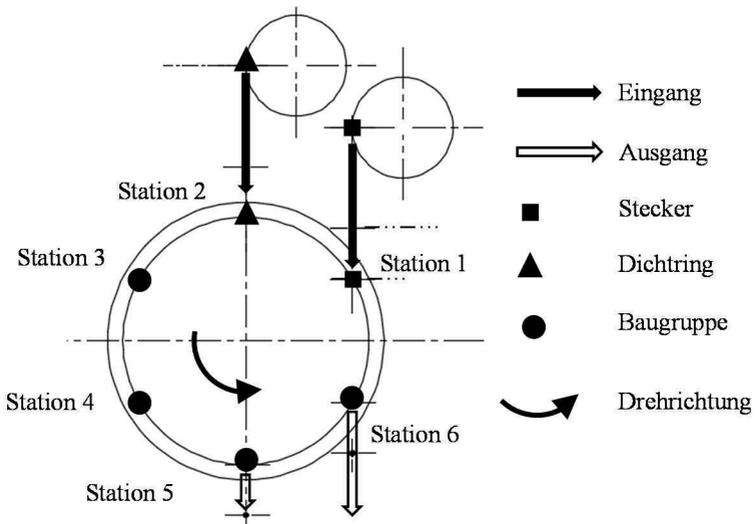


Abb. 1.3: Schematische Darstellung eines Rundtaktautomaten

Die VDI 2860 stellt im Wesentlichen begriffliche Definitionen und eine Symbolsprache zur Beschreibung und Abbildung von Handhabungsprozessen und deren Untergliederung in Funktionen zur Verfügung. Die standardisierten Symbole sind genormte Bildzeichen mit definitionsgemäß zugeordneten Funktionen, die zum Aufstellen sogenannter Funktionsfolgen verwendet werden. Mit dem Aufbau einer Funktionsfolge erfolgt die schematische Beschreibung und Abbildung einer Montageaufgabe jedoch ohne die Berücksichtigung

sichtigung physischer und ökonomischer Parameter. Diese allgemeine graphische Darstellung vom Material- und Informationsfluss der Montageaufgabe ist geräteneutral und gibt keine konkreten Anhaltspunkte für die einzusetzenden Anlagenkomponenten. Umgekehrt lässt sich dagegen für ein Handhabungsgerät der funktionelle Inhalt immer sehr genau angeben [Hes13]. Die VDI 2860 ist in ihrem Anwendungsumfang somit eingeschränkt, da sie den Handhabungsprozess nur allgemein beschreibt. Eine beispielhafte Funktionsfolge eines Rundtaktautomaten kann der folgenden schematischen Darstellung (s. **Abb. 1.3**) entnommen werden.

Im gezeigten Beispiel werden ein Stecker und ein Dichtring gefügt. Dieser Montageprozess wird automatisiert auf einem Rundtaktsystem umgesetzt. Mit Hilfe der Symbolsprache der VDI 2860 wurde in **Abb. 1.4** eine Funktionsfolge bzw. Funktionsplan zur Beschreibung des Montageprozesses erstellt. Aufgrund fehlender Informationen in der Funktionsfolge, wie z. B. die räumliche Position und Orientierung der Objekte im Bezug zur zeitlichen Abfolge sowie weiterer Vorrichtungs- und Geräteparameter, ist der Funktionsplan nicht eindeutig interpretierbar.

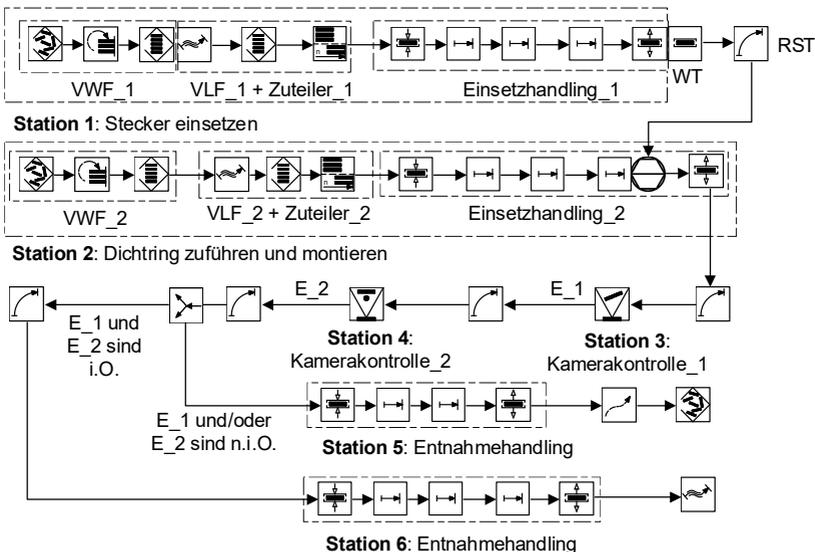


Abb. 1.4: Beispiel einer symbolischen Funktionsfolge

Diese fehlenden Informationen machen den Einsatz der VDI 2860 oft unhandlich im Gebrauch für die Montage- und Handhabungsplanung. Demnach ist die beschriebene Methodik maßgebend auf die Abbildung des prozessspezifischen Materialflusses (Funktionsfolge) ausgelegt. Eine konkrete Vorbereitung zur definierten Planung von Handhabungsabläufen muss eindeutig formuliert und dargestellt werden. Hauptaufgabe bei der Realisierung eines automatisierten Montagesystems ist die physische Entwicklung der festgelegten Funktionen durch Funktionsträger. Beispielsweise werden Handhabungs-, Fließband-, Füge-, Prüf- oder Ordnungseinrichtungen ausgewählt und in einer Gesamtanlage räumlich angeordnet und ausgerichtet. Demnach wird im Zuge der Planung von automatisierten Montagesystemen zunächst der prozessspezifische Material- und Informationsfluss aufgestellt.

Für die physische Gestaltung und Umsetzung des geplanten Materialflusses müssen Konzepte methodisch ausgearbeitet werden. Bei der sinnfälligen Auswahl, Kombination und Anordnung geeigneter Bewegungs-, Füge-, Kontroll-, Speichereinheiten usw. kommen meist morphologische Kästen zum Einsatz. Der Anlagenentwurf und die Auswahl geeigneter Komponenten erfolgt nach der Methodik zur systematischen Entwicklung von technischen Lösungen [Löh77], [Hes13]. Für jede Funktion werden im morphologischen Kasten theoretische Lösungen gesucht oder in Sonderfällen explizit entwickelt. Mit Hilfe dieser etablierten Werkzeuge und dem Einsatz standardisierter Komponenten werden Entwicklungs- und Anschaffungskosten der Anlagentechnik gesenkt und die Verfügbarkeit der Anlage erhöht [Kra99].

Neben der Anordnung im Gesamtsystem muss eine geeignete Steuerung und Konstruktion zur Realisierung des Informationsflusses implementiert werden. In einem iterativen Prozess wird die entstandene Gesamtlösung mit allen inhärenten Hard- und Softwareverknüpfungen auf Ihre Funktionalität geprüft und optimiert. In der Regel entstehen bei der Anwendung dieser Methodik mehrerer potentielle Gesamtlösungen, die in einem geeigneten Bewertungsverfahren miteinander verglichen werden müssen, um die optimale Lösung auszuwählen. In diesem Bewertungsverfahren müssen alle Spezifikationen der Anforderungsliste, wie z. B. Zykluszeit, Tragkraft, Preis, Nutzungsdauer usw., berücksichtigt werden. Vor allem bei der Auswahl entsprechender Komponenten sowie der Taktzeitoptimierung sind die individuellen Erfahrungswerte des bearbeitenden Konstrukteurs entscheidend.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Für die effiziente Planung und physische Entwicklung von automatisierten Montagesystemen ist die konkrete Beschreibung des prozessspezifischen Material- und Informationsflusses unabdingbar. Zur Verbesserung der VDI 2860 wurde die Symbolsprache von S. Hesse bereits erweitert und neue Symbole für die Planung von Handhabungseinrichtungen geschaffen [Hes13]. Für die ganzheitliche Planung und gezielte Optimierung unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte ist jedoch eine grundlegende Erweiterung der Symbolsprache notwendig, um die Herangehensweise an den symbolischen Anlagenentwurf durch zusätzliche Informationen und Parameter auch mathematisch eindeutig beschreibbar umzusetzen. Diese bestehende Lücke ist ein entscheidender Ansatzpunkt zur Entwicklung eines neuen effizienten Planungswerkzeugs.

Die physische Gestaltung und Umsetzung wird durch eine konkrete Vorgehensweise für die systematische Lösungssuche nach [Löh77], [Bul86] oder [Hes13] beschrieben, die sich jedoch ausschließlich auf den allgemeinen Ansatz der methodischen Produktentwicklung bezieht. Diese Vorgehensweise stützt sich im Wesentlichen auf den Funktionsplan und setzt die methodischen Schritte der iterativen Produktentwicklung um. Im Anschluss an die Auswahl geeigneter Funktionsträger und deren sinnfällige Kombination in einer Gesamtlösung erfolgt die Optimierung der Montageanlage. Durch die gezielte Integration des Materialflusses in die Anlagenplanung ergeben sich mit der Auswahl und Kombination geeigneter Anlagenkomponenten erste Anhaltspunkte für Taktzeiten sowie Montage- und Anlagenkosten. Eine direkte und kontinuierliche mathematische Beschreibung und Optimierung der möglichen Taktzeiten und der gerätespezifischen Anschaffungskosten ist dabei jedoch nicht vorgesehen.

Zielstellung der vorliegenden Arbeit bestand darin, das Potential eines effizienten Montageplanungssystems auf Basis und in gezielter Erweiterung der bekannten Symbole zu erforschen. Die Herausforderung dabei liegt in der Entwicklung einer neuen Symbolsprache um Informationen, wie z. B. die räumliche Position und Orientierung der Objekte im Bezug zur zeitlichen Abfolge, sowie weitere Vorrichtungs- und Geräteparameter bereit zu stellen. Die zu entwickelnden neuen Symbole übernehmen die Aufgabe einer technologischen Kopplung der Funktionsfolge und der physischen Umsetzung. Für

die maßgebende Definition des Materialflusses müssen die Positionen und Orientierungen von Werkstücken im Bezugskordinatensystem festgelegt werden. Ausgehend von diesen Eingangsparametern kann ein Konstrukteur die notwendigen Abmessungen, Gerätetypen etc. bestimmen. Zur Realisierung der Montageaufgabe und Vermeidung der Kollision von Montageeinrichtungen werden die Arbeitsprinzipien der Montageeinrichtungen dargestellt. Im weiteren Planungsverlauf spielen Steuerungssignale eine wichtige Rolle für die systematische Modellierung, die aber nicht näher betrachtet werden.

Die vollständigen Wechselwirkungen von Werkstücken und Anlagenkomponenten werden mit Hilfe von Weg-Schritt-Diagrammen beschrieben. Aus diesen Diagrammen werden die betriebsmittelbezogenen Arbeitsrangfolgen bestimmt, um eine entsprechende Steuerung der Anlage aufzubauen. Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeit ist der beispielhafte Aufbau eines Montagesystems mit dem Ziel der kleinstmöglichen Taktzeit und den günstigsten Anschaffungskosten. Dazu wird ein linearer Optimierungsalgorithmus implementiert, der ein mathematisches Modell der Anlagentechnik hinsichtlich der minimalen Taktzeit und Kosten löst. Die Lösung der Optimierungsaufgabe erfolgt unter der Berücksichtigung geeigneter Anlagenkomponenten und deren spezifischen Parameter, die in Datenbanken hinterlegt und gespeichert sind.

Die Zielsetzung und die konkreten Schwerpunkte der Arbeit sind:

- Erarbeitung des Parameterraums für eine neue Symbolsprache in Anlehnung, Erweiterung und Ergänzung der VDI 2860
- Entwicklung neuer Symbole mit integrierten Schnittstellen für die technologische Verknüpfung einzelner Symbolelemente zu Funktionsfolgen und deren praktische Umsetzung als Handhabungs- und Montageeinrichtung
- Entwicklung einer neuen und parameterorientierten Methodik unter Anwendung symbolischer Algorithmen zur Analyse, Beschreibung und Planung von Handhabungs- und Montageprozessen

- Aufbau einer virtuellen Bibliotheksoberfläche als Montageplanungssystem zur effizienten Anwendung der neuen Symbolelemente und Funktionsfolgen in Microsoft Visio
- Beschreibung der Funktionsträgerabläufe mit Hilfe von Weg-Schritt-Diagrammen für die Verifikation tatsächlich realisierbarer Funktionsfolgen
- Aufstellen mathematischer Algorithmen zur Minimierung der Taktzeiten sowie Montage- und Anlagenkosten und Lösen der Optimierungsaufgabe durch CPLEX Studio

2 Stand der Technik

2.1 Montage- und Handhabungstechnik

2.1.1 Einordnung in den Wertschöpfungsprozess

Montage- und Handhabungsaufgaben sind ein wesentliches Element der Produktion und Fertigung in wertschöpfenden Unternehmen. Diese wiederum sind ein existenzieller Bestandteil im makroskopischen Wertschöpfungsprozess. In makroskopischen Betrachtungen werden komplexe Interaktionen zwischen Lieferanten, Kunden und vielen weiteren Elementen der freien Marktwirtschaft berücksichtigt. Wohingegen ein mikroskopischer Wertschöpfungsprozess innerhalb eines einzelnen Unternehmens im Wesentlichen auf Aktivitäten, wie Beschaffung, Forschung, Entwicklung, Konstruktion, Produktion usw. reduziert werden kann [Jun12]. Die Produktion steht dabei übergeordnet für die notwendigen Schritte zur wertschöpfenden Fertigung von Produkten. Mit den Funktionen der Arbeitsorganisation, des Qualitätsmanagements, der Planung und Steuerung werden zudem wirtschaftlichen Aspekte, wie Investitionen, Kosten, Kapazitäten, Liefertermine usw., beachtet. Aufgabe der Montage ist das produktive und wirtschaftliche Zusammenführen definierter Einzelteile in einer festgelegten Reihenfolge, dem sogenannten Montageprozess [Zie08]. Eine hierarchische Einordnung der Montage und Produktion in einem Unternehmen kann **Abb. 2.1** entnommen werden. Allgegenwertige und verknüpfende Beziehungen dieser Bestandteile sind der Material- und Informationsfluss.

Unternehmerische Strategien produzierender Firmen orientieren sich im Wesentlichen an den Aspekten der Produkteigenschaften und der notwendigen Prozesse zu deren Herleitung (Produktion). Schritt für Schritt werden Kundenwünsche umgesetzt und eine bedarfsorientierte Kostenkalkulation berücksichtigt. Das Markenbewusstsein und verschiedene Mechanismen der Kundenbindung und Kundenakquise gewinnen zunehmend an Bedeutung [Man15]. Aus diesen Gesichtspunkten heraus entwickelt sich das Marketing als modernes Instrument zeitgerechter und erfolgreicher Unternehmen. Demnach ist die zentrale Grundlage der modernen Betriebswirtschaftslehre eine verlässliche Bedarfsanalyse des Marktes und somit der potentiellen Kunden

um konkurrenzfähige Produkte anbieten zu können [Töp05]. Das Preisgefüge dieser Produkte setzt sich neben den reinen Materialkosten aus dem Fertigungs- und Montageaufwand mit geforderter Qualität ab. Gleichzeitig müssen kurzfristige Termin- und Mengenanpassungen möglichst flexibel bewerkstelligt und in der Produktionsplanung berücksichtigt werden. Deshalb muss die Produktion insbesondere an Liefertermine und weitere Fristen, schwankende Liefermengen und wechselnde Produktvarianten angepasst werden [Wes01].

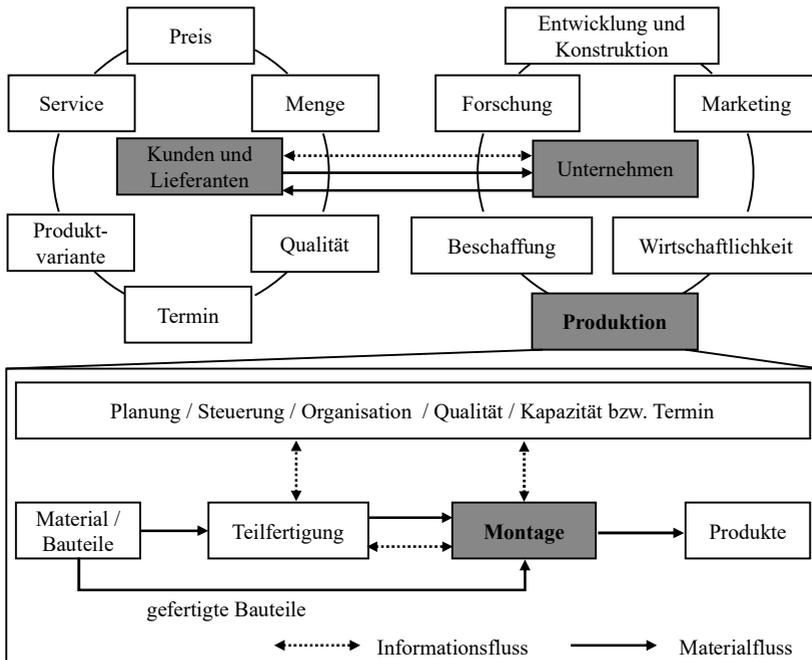


Abb. 2.1: Einordnung der Montage und Produktion [Zie08]

Im eigentlichen Wertschöpfungsprozess der Produktion konvertiert ein Unternehmen bestimmte Eingangsmaterialien und Bauteile in ein Endprodukt. Die Produktion besteht dabei aus den übergeordneten Einheiten, wie der Planung, Steuerung, Organisation, sowie der Teilefertigung und Montage. Im

Fokus dieser Arbeit steht die Montage als erfolgsentscheidender Anteil der Produktion [Ble11], die sich mit folgenden Teilaufgaben beschreiben lässt:

- **Montageplanung** umfasst die Analyse einer Montageaufgabe, den Entwurf und die Gestaltung eines Montagesystems sowie dessen Einführung und Inbetriebnahme [Ble11]. Ausgehend von der Werkstückbereitstellung und dem Einsatz weiterer notwendiger Materialien wird genau die geplante Menge an Produkten montiert. Für die Montageplanung sind Stücklisten und Werkstückmerkmale sowie notwendige Montageabläufe notwendig, um eine entsprechende Material- und Kapazitätsrechnung durchführen zu können [Tho07].
- **Montagesteuerung** ist ein Teilbereich der Produktionssteuerung. Jeder Montagevorgang wird nach entsprechender Zielvorgabe geplant, gesteuert und überwacht [Ble11].
- Für das **Qualitätsmanagement** wird nicht nur der Materialfluss, sondern auch die Operationsprozesse bzw. Fertigungseinrichtungen geprüft und überwacht. Im Hinblick auf die Qualität sind steigende Anforderungen und Zielstellungen zu erwarten [Kon03].

Anhand dieser Teilaufgaben ist bereits der innerbetriebliche Material- und Informationsfluss ablesbar. Ein Beispiel dafür ist der Materialfluss an einen Arbeitsplatz, welcher durch ein Zuführsystem realisiert wird. Dieses Zuführsystem erfüllt die Handhabungsfunktionen, wie Zuteilen, Führen, Fördern, Weitergeben, Ordnen usw., und verknüpft die einzelnen Stationen mit dem gesamten innerbetrieblichen Materialfluss. Der Materialfluss ist wiederum mit Hilfe eines entsprechenden Informationsflusses gesteuert. Im eingangs gezeigten Beispiel der Fließfertigung (s. **Abb. 1.1**) werden Werkstücke mit einem Förderbandsystem transportiert. Zugehörig erfolgt die Anordnung der Arbeitsplätze und Stationen zweckmäßig in der Reihenfolge des Fertigungsablaufs.

Der für eine effektive Produktion und Montage notwendige Informationsfluss muss im Wesentlichen bereits zur Planung des Montagesystems bekannt sein. Insbesondere orientiert sich die Entwicklung an Stücklisten, Zeichnungen, Montageanweisungen, Prüfdaten und weiterer Daten.

2.1.2 Begriffliche Zuordnung und Definitionen

Mit dem Begriff "Montage" wird die Gesamtheit aller Vorgänge für die festgelegte Zusammenstellung von geometrisch bestimmten Objekten und Elementen bezeichnet. Auch die notwendigen Zusatzaufgaben, wie die Materialhandhabung, Justage, Überprüfung der Endprodukte sowie weitere Hilfsoperationen, sind inbegriffen. Nach der VDI 2860 sowie der DIN 8593 "Fertigungsverfahren Fügen" [DIN8593] werden die Montagefunktionen weiter in primäre und sekundäre Montagefunktionen (s. **Abb. 2.2**) unterteilt. Während jedes Montagevorgangs wird mindestens ein Fügevorgang durchgeführt. Das Ergebnis einer Montageaufgabe ist ein komplettiertes Endprodukt, eine definierte Baugruppe oder eine Montageeinheit.

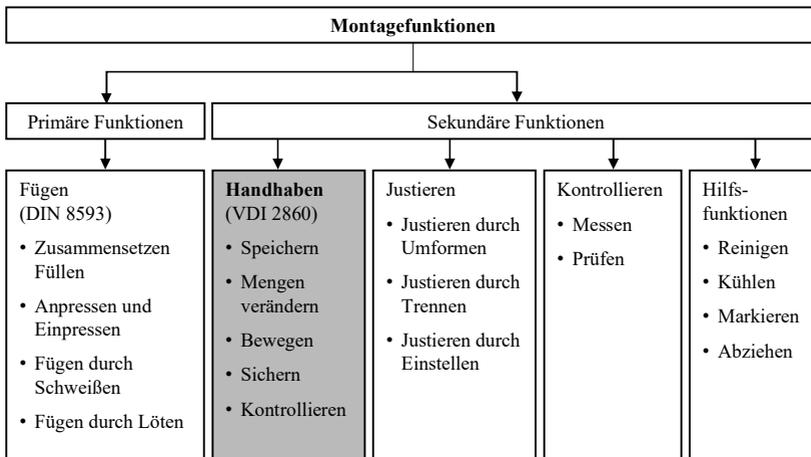


Abb. 2.2: Montagefunktionen in Anlehnung an DIN 8593 und VDI 2860

Demnach entspricht ein Fügevorgang nicht automatisch einem Montagevorgang. Vielmehr ist das "**Fügen**" ein Bestandteil des Montierens und wird entsprechend der DIN 8593 definiert:

"Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt." [DIN8593]

Die Funktion "**Handhaben**" ist ebenfalls eine Funktion der Montagefunktionen. Der Begriff "Handhaben" umfasst nach dem deutschen Sprachgebrauch zwei Bedeutungen:

"(ein Werkzeug, Instrument usw., was man bei seinem Gebrauch in der Hand hält, mit der Hand führt) führen, bedienen, brauchen" [Dud17] und

"etwas [bei dessen Auslegung, Ausführung oder Anwendung ein gewisser Spielraum geben] in bestimmter Weise aus-, durchführen, praktizieren" [Dud17].

Im technischen Sprachgebrauch wird der Begriff "Handhaben" durch die VDI 2860 definiert:

"Handhaben ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem." [VDI2860]

Der Begriff "Funktionsträger" wird durch die VDI 2860 definiert:

"Funktionsträger (FT) des Handhabens bzw. Werkzeuge sind technische Einrichtungen zur Realisierung der definierten Handhabungsfunktionen."

In dieser Arbeit werden zusätzlich die Begriffe "Funktionsträgerliste" und "Anforderungsliste" eingeführt. Diese Begriffe werden wie folgt definiert:

"Funktionsträgerliste (FTL) ist eine Liste der technischen Lösungen eines Funktionsträgers zum Aufbau einer Montageanlage".

"Funktionsträgervariante (FTV) ist eine Auswahlmöglichkeit eines Funktionsträgers aus einer FTL."

"Anforderungsliste ist eine systematisch erarbeitete Zusammenstellung aller wesentlichen Informationen. Sie bestimmt die Voraussetzungen zur Auswahl Funktionsträgerliste."

Beim Handhaben wird eine erforderliche Menge an Werkstücken mit einer definierten Position und ggf. Orientierung zu einem exakten Zeitpunkt auf-

genommen. In den folgenden Schritten erfahren die aufgenommenen Werkstücke eine Änderung ihrer Position bzw. Orientierung um beispielsweise gespeichert oder direkt verarbeitet zu werden. Damit befinden sich während eines kompletten Montageprozesses alle Werkstücke in einem zusammengesetzten Bewegungsablauf mit sich ständig ändernder Position und Orientierung. Mit dem zunehmenden Maße der Automatisierung von Handhabungsprozessen steigt zumeist auch die Wirtschaftlichkeit der Fertigung. Die wesentliche Aufgabe der Automatisierung ist es jedoch, schwere, monotone oder gefährliche Arbeiten für den Menschen zu übernehmen [Hes13].

Wie bereits Konold [Kon03] schreibt, besteht ein Montagesystem aus Montagestationen und Anlagenkomponenten zur Realisierung der Montageaufgabe und mindestens einem Verkettungsmittel. Dieses System bildet einen Gesamtkomplex aus Handhabungs- und Fügeeinrichtungen, Prüf- und Kontrolleinrichtungen, Ordnungs- und Zuführeinrichtungen sowie peripheren Versorgungseinrichtungen. Montagesysteme werden nach **Abb. 2.3** in drei Hauptgruppen eingeteilt.

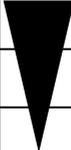
	Investition	Flexibilität	Entwicklungszeit	Schwierigkeitsgrad	Losgröße	Arbeitsinhalt
automatische Montage						
hybride Montage						
manuelle Montage						

Abb. 2.3: Auswahlkriterien für Montagesysteme nach [Kon03], [Ric84], [Lot12]

Eine vollautomatische Montage ist nur für hohe Stückzahlen wirtschaftlich zu betreiben und setzt ein großes Investitionsvolumen für spezialisierte und wenig flexible Prozesse voraus. Im Gegensatz dazu werden bei manueller Montage vergleichsweise geringe Stückzahlen produziert. Als Zwischenstufe ist die hybride Montage zu nennen, in der lediglich Füge- und Prüfvorgänge automatisiert werden [Lot12]. Nach E. Richter [Ric84] hängt die Automatisierungsstufe vom Schwierigkeitsgrad (Zugänglichkeit, Starrheit der Werk-

stücke, Komplexität der Hauptbewegungen, Ordnungszustand der zuzuführenden Werkstücke etc.) der einzelnen Montagevorgänge ab und wird mit Hilfe einer Rangfolge definiert. Zusätzliche Kriterien sind die Anzahl der zu montierenden Einzelteile bzw. der Arbeitsinhalt einer Montagestation sowie die Entwicklungszeit. Die Entwicklungszeit für eine automatische Montage ist meist deutlich länger als für hybrides oder manuelles Montieren [Kon03].

2.1.3 Gliederung von Montagesystemen

Die technische Einrichtung zur Montage eines Produkts, verschiedener Produkte oder von Produktvarianten wird als Montageanlage bezeichnet. "*Montageanlagen sind z. B. Montagestationen, Montagezellen und Montagesysteme*" [Ble11]. Ein Montageprozess ist mit vielfältigen und meist produkt-spezifischen, technischen sowie organisatorischen Parametern charakterisiert. Beispielsweise wird ein vollautomatisches Montagesystem hinsichtlich einer hohen Ausbringungsmenge konzipiert und optimiert. Jede Montageaufgabe wird entsprechend einer geeigneten Layoutplanung konzipiert und umgesetzt. Dabei wird in manuelle, hybride und automatisierte Montagesysteme unterschieden. Manuelle und hybride Montagesysteme sind in einem Karree, in einer U-Form oder Linie, mit als auch ohne Werkstückträger aufgebaut bzw. angeordnet. Automatische Montagesysteme können aus einem Rundtransferautomat, Längstransferautomat, aus einer flexiblen Roboterzelle und/oder einer flexiblen Roboter Montagelinie bestehen [Kon03]. Nach Bley [Ble11] und Hesse [Hes93] werden Montagesysteme für den Zusammenbau von kompletten Produkten verwendet und können dabei miteinander lose oder starr verkettet sein. Dabei besteht ein Montagesystem aus mehreren Stationen, welche wiederum durch Transfersysteme untereinander verkettet sind (s. **Abb. 2.4**).

Die **Montagestation** ist die kleinste Einheit eines Montagesystems. Sie vollzieht eine Montageoperation zur Erfüllung einer speziellen Montageaufgabe. Eine vollautomatisierte Montagestation wird bei großen Stückzahlen eingesetzt und ein stationäres, festes Steuerprogramm implementiert. Für flexible Montagestationen dient der Montageroboter als Grundkomponente. Der Montageroboter arbeitet zusammen mit peripheren Einrichtungen. Dies wird durch seine freie Programmierbarkeit ermöglicht. Die Taktzeit einer Montagestation ist eine wichtige technische Variable, um die Beschaffung eines

Montagesystems zu begründen. Eine Bestimmung der Taktzeit erfolgt über die Zerlegung der einzelnen, aktionsbezogenen Taktzeiten in Taktzeitelemente. Eine Montagestation umfasst folgende Aktionen, welche sich auf die Taktzeit der Montagestation auswirken: Greifen/Loslassen, Greiferwechsel, Fügen, Bewegen, Reaktionszeiten von Sensorsystemen, Prüf- und Wartezeiten [Sch89].

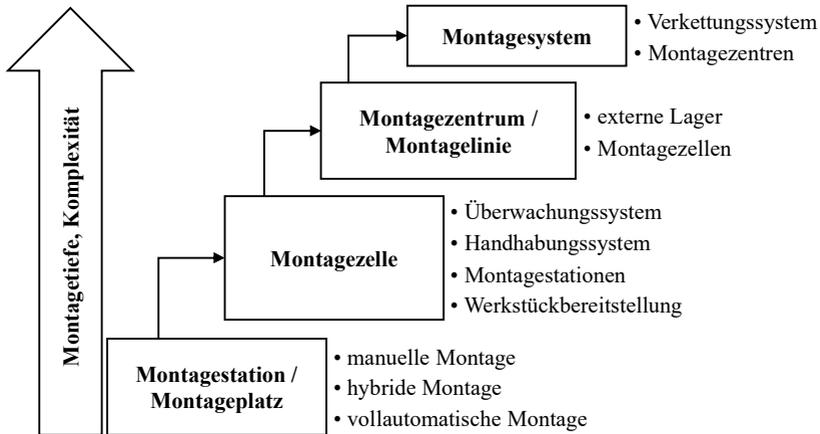


Abb. 2.4: Gliederung von Montagesystemen nach [Hes93]

Eine **Montagezelle** beinhaltet die automatisierten Montagestationen mit integriertem Handhabungs-, Werkstückbereitstellungs- und Überwachungssystemen. Diese sind für die Montage einer Einzelbaugruppe oder eines einfachen Produktes vorgesehen. Die Automatisierung und Verknüpfung der einzelnen Stationen erfolgt mit Hilfe eines geeigneten Transfersystems. Ausgehend von allen Handhabungsoperationen wird die Zellentaktzeit bestimmt [Hes93]. Spricht man von einem **Montagezentrum** werden die zellenexternen Lager für Montageaufträge zuzüglich berücksichtigt. In **Montagesystemen** werden mindestens zwei Montagezentren in entsprechender Reihenfolge über ein Verkettungssystem verbunden [Jon00].

2.2 Symbolische Beschreibung von Montagesystem

2.2.1 Analyse und formale Beschreibung von Funktionen

Im Rahmen der Montageplanung ist das Montagesystem eine Einrichtung, um eine bestimmte Aufgabe bzw. Gesamtfunktion durchzuführen. Ein Montagesystem besteht aus unterschiedlichen und aufgabenbezogenen Funktionsträgern. Jede dieser Anlagenkomponenten dient der Funktionserfüllung und übernimmt eine Teilaufgabe im Gesamtprozess. Für die Planung und graphische Darstellung einer Montageeinrichtung erfolgt zunächst eine strukturelle Darstellung aller zu montierenden Elemente und deren Interaktionen bzw. Verknüpfungen.

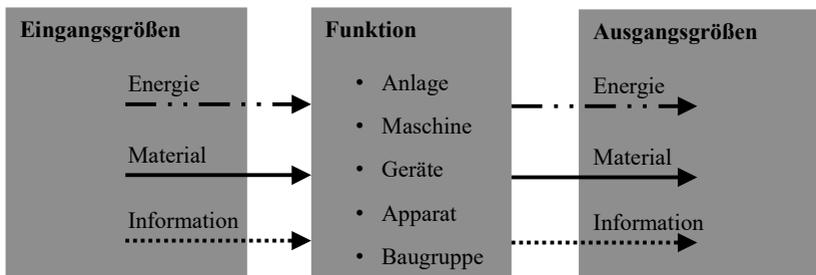


Abb. 2.5: Funktionsbeschreibung mit Eingangs- und Ausgangsgrößen
[Fel13], [Con13]

Auch die Funktion eines meist komplexeren Montagesystems wird mit Hilfe der genannten Eingangs- und Ausgangsgrößen eindeutig definiert [Hub92]. Wie in **Abb. 2.5** gezeigt, werden für die strukturelle Darstellung die drei Grundgrößen Energie, Stoff bzw. Material und Information eingesetzt, die auch mathematisch eindeutig als Funktion formulierbar sind [Wei14]. Als Stoff bzw. Material werden die im Montagesystem zu fügenden Einzelteile und Baugruppen bezeichnet. Die Energie entspricht dem Energieumsatz der Funktionsträger im Montagesystem. Als Information werden Signale zur Steuerung der Anlagen und deren Kommunikation mit der Umwelt bezeichnet [Fel13], [Con13].

Ausgangspunkt der Planung eines Montagesystems ist die eindeutige Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsgrößen, um den Montageprozess sowie dessen Teilaufgaben zu beschreiben. Für die Bestimmung dieser Größen (s. **Tabelle 2.1**) wird bisher meist eine geräteorientierte und erfahrungsbaasierte Herangehensweise gewählt [Wei14]. Um die Gesamtfunktion umzusetzen, werden Eingangsgrößen gemäß den geforderten Ausgangsgrößen verändert. Die Funktion entspricht einer neutralen Formulierung, um Anlagenkomponenten suchen zu können. Je nach Aufgabenstellung müssen geeignete Funktionsträger ausgewählt und kombiniert werden. Hierfür wird die Gesamtfunktion in Unterfunktionen zerlegt [Spu14].

Tabelle 2.1: Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Montagesystems [Wei14], [Spu14]

Eingangsgrößen		Ausgangsgrößen	
Stoff	<ul style="list-style-type: none"> - Einzelteile/ Baugruppen - Anlieferung 	Stoff	<ul style="list-style-type: none"> - montierte Baugruppe oder Produkte - Ablieferung
Information (Signale)	<ul style="list-style-type: none"> - Kapazitätsbedarf - Stückzahlen - Nutzungsdauer - Ressourcen 	Information (Signale)	<ul style="list-style-type: none"> - Termin, Kosten, Taktzeit - Kapazität - Flexibilität - Qualität
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - chemische - elektrische - thermische 	Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Verlustwärme - Lärm - Schwingungen

2.2.2 Symbole zur Beschreibung eines Montagesystems

Um ein Montagesystem mit gegebenen Eingangs- und Ausgangsgrößen anschaulich darzustellen, wird in der Regel eine symbolische Funktionsbeschreibung verwendet. Auf Basis der in **Abb. 2.6** gezeigten Symbole, können komplexe Systeme durch das Zusammensetzen von Teilsystemen in Reihen-, Parallel- oder Kreisschaltungen beschrieben werden.

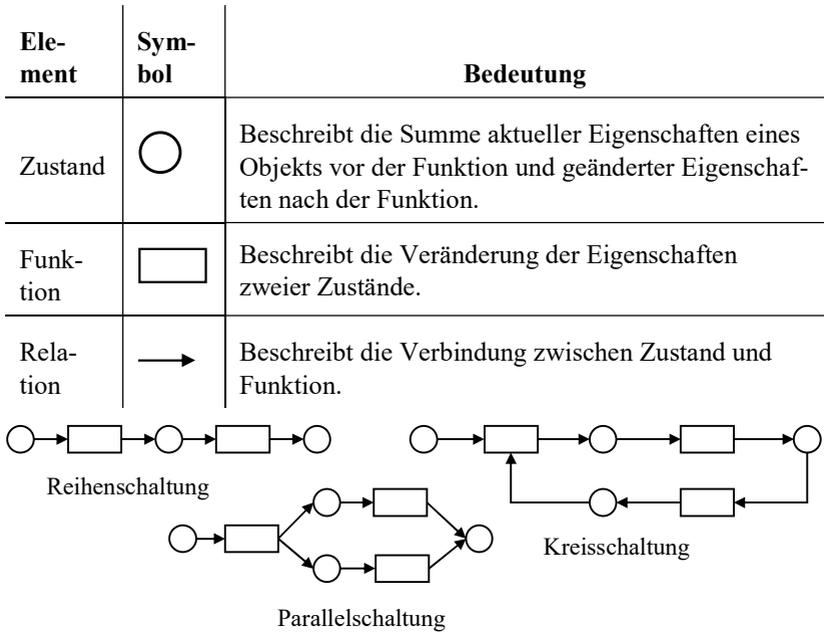


Abb. 2.6: Funktionsfolge mit symbolischer Darstellung [Ehr13]

Mit dem Stoff- bzw. Materialfluss sind grundsätzlich alle mikroökonomischen Betriebsabläufe abgedeckt. Für die Analyse und Darstellung dieser Abläufe in einem Materialflussschema oder Materialflussbogen stellt die VDI 3300 "Materialfluss und Fördertechnik" [VDI3300] sechs Symbole bereit (s. **Tabelle 2.2**). Im Materialflussschema können diese Symbole auf Grundrissplänen für z. B. Fabrikgelände, Gebäude oder Räume angewendet werden. Damit werden die Wege sowie die Abläufe in der Layoutplanung erläutert und verdeutlicht.

Beim Verwenden der Materialsymbole im Materialflussbogen werden die Materialflusssymbole für die Einzelvorgänge dargestellt. Somit sind die Anzahl der Vorgänge und die Transportstrecke überprüfbar. Nach VDI 3300 sollen unnötige Vorgänge vermieden und Transportwege reduziert werden. Ausgangspunkt der Entwicklung eines Montage- und Handhabungssystems ist die Analyse aller Funktionen einer Montagereihenfolge. Damit wird jede

Funktion einzeln betrachtet und ein entsprechender Funktionsträger gesucht. Für die konkrete Beschreibung einer Montage- und Handhabungsaufgabe hat sich der Einsatz von Funktionssymbolen etabliert.

Tabelle 2.2: Materialflusssymbole [VDI3300]

	Bear- beiten	Handha- ben	Transpor- tieren	Prü- fen	Aufent- halt	La- gern
Sym- bol	+	○	>	□	D	△

Die VDI 2860 enthält Begriffe, Definitionen und Symbole für die Handhabungstechnik und gibt eine Lösung zur Darstellung einer Montage- und Handhabungsaufgabe. Die unterschiedlichen Handhabungsaufgaben werden durch die Symbole aus dieser Richtlinie dargestellt (s. **Tabelle 2.3**).

Tabelle 2.3: Grundsymbolsymbol für Handhabungs- und Fertigungsaufgaben [VDI2860]

Grundsymbolsymbol	Funktion
□	Handhabenfunktion
▽	Kontrollfunktion
○	Fertigungsfunktion

Diese Symbole sind ein graphisches Werkzeug für die Planung von Montage- und Handhabungssystemen. Auf Basis dieser Grundsymbolsymbole wurden weitere spezialisierte Symbole entwickelt und für die Definition von Funktionen standardisiert (s. **Anhang 9.1.1**). Die interdisziplinäre Verwendung der Symbole führt zu Informationslücken bei der Beschreibung von Funktionen. Zur besseren Anwendung sollen die wesentlichen Parameter für Funktionen ergänzt werden. In der Fachliteratur werden folgende Lösungsbeispiele verdeutlicht:

- Durch das Verwenden von Handhabungsfunktionen können verschiedene Handhabungsaufgaben formuliert werden. Im Hinblick auf die Programmierung für Handhabungsgeräte hat G. Herrmann [Her76] die Handhabungsfunktionen analysiert. Folgend wurden wesentliche Parameter für die Steuerung der Funktionen ergänzt. Ein Beispiel für die Funktion "Führen" ergibt sich wie folgt: Die Parameter Bewegungsbahn, Weg, Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung präzisieren die Funktion.
- Schimke [Sch78] verwendet Symbole zur Planung von Handhabungssystemen. Die Ermittlung und Beschreibung aller Einflussgrößen bildet dabei eine grundlegende Voraussetzung, da für jeden Arbeitsplatz bzw. Station alle wichtigen Parameter festzulegen sind. Somit ist das Handhabungssystem mit Objekten und Ablauf beschreibbar.
- Kallenbach [Kal81] beschreibt die Handhabungsabläufe von Industrierobotern durch die Erweiterung der Symbole mit Bewegungsdaten und Bewegungsrichtungen.
- Hesse [Hes92] benutzt die Symbole zur Beschreibung des Arbeitsprinzips von unterschiedlichen Handhabungseinrichtungen. Wegen fehlender Symbole konnte er nicht alle Einrichtungen, in Form von Handhabungsgeräten, in seinem Atlas der Montage- und Handhabungstechnik darstellen. Aus diesem Grund hat er eine Erweiterung der Grundsymbole eingeführt.

Der Stand der Technik zeigt die bestehenden Lösungen zur Montageplanung mit Hilfe von Symbolen. Alle Symbole entsprechen im Wesentlichen den in der VDI 2860 hinterlegten Elementen die jedoch ohne anlagenkomponentenspezifische Informationen bzw. Schnittstellen zu deren mathematisch definierter Verknüpfung ausgestattet sind. Um diese gegebene Lücke zu schließen und eine effektive Planung, Komponentenauswahl und Taktzeitoptimierung rechnerbasiert zu ermöglichen, liegt das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit auf der Entwicklung parametrisierter und mathematisch beschreibbarer Symbole mit hinterlegten Parametern.

In anderen Bereichen, wie Getriebe-, Schweiß-, Hydraulik-, Pneumatik-, Verfahrens- und Energietechnik, wird ebenso oft auf eine symbolische Darstellung zurückgegriffen, um schematische Pläne zu erstellen. Handhabungssymbole werden u.a. in der Vakuumtechnik verwendet, z. B. durch die Fa. Festo [Fes17]. Allerdings lassen sich einige dieser Symbole nicht klar interpretieren, da die Symbolen und die begrifflichen Beschreibungen nicht eindeutig zugeordnet sind (s. **Abb. 2.7**).

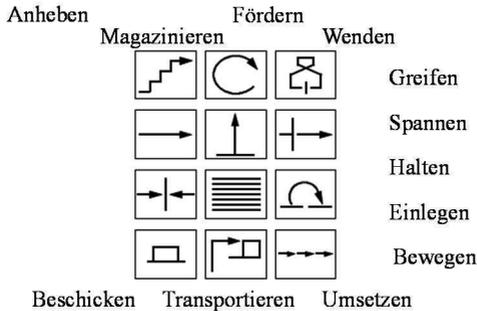


Abb. 2.7: Handhabungssymbole im Einsatz von Vakuum [Fes17]

2.2.3 Aufbau einer Funktionsfolge

Die Funktionsfolge ist die graphische Darstellung einer logischen Reihenfolge von Montage- und Handhabungsfunktionen durch Symbole und deren Verknüpfungen. Zum Aufbau einer Funktionsfolge wird nachfolgend ein Beispiel für eine Station eines Rundtaktautomaten beschrieben. Die in einem Magazin gespeicherte Chiphalter sollen für einen Montageprozess auf einen Rundscharittisch übergeben werden. Die zugehörige Funktionsfolge, unter Verwendung der bekannten Symbole aus der VDI 2860, für den Handhabungsablauf der Chiphalterzuführung und des Einsetzhandlings ist in **Abb. 2.8** dargestellt.

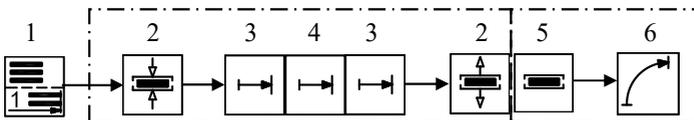
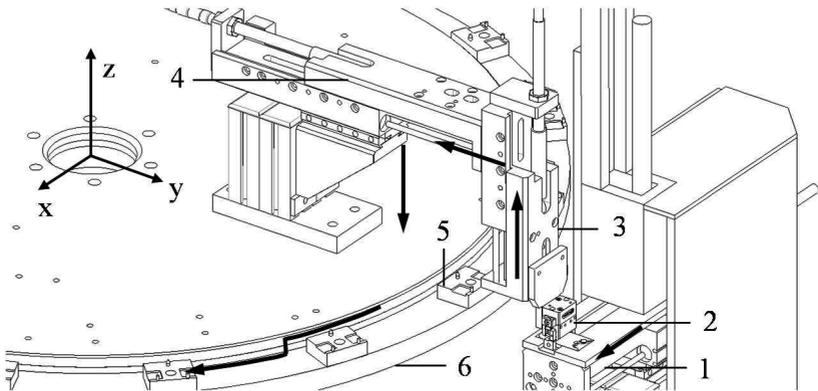


Abb. 2.8: Funktionsfolge einer Station des Rundtaktautomaten

Ein Chiphalter wird aus dem Magazin durch den Schieberzuteiler Nr. 1 abgeteilt. An der Endlage des Zuteilers wird der Chiphalter durch den Greifer Nr. 2 gefasst. Dann wird der Chiphalter durch die Horizontal- und Vertikalschlitten Nr. 3 und Nr. 4, kombiniert als Pick & Place Einheit, in die Werkstückaufnahme Nr. 5 eingesetzt. Der Chiphalter wird durch die Werkstückaufnahme formschlüssig gehalten und dann durch den Rundschalttischen Nr. 6 bewegt. Entsprechend der Funktionsträger sind die Symbole der Funktionsfolge nummeriert (s. **Abb. 2.9**).



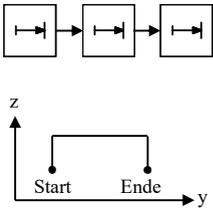
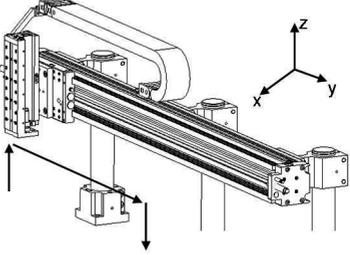
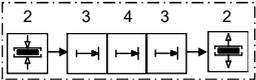
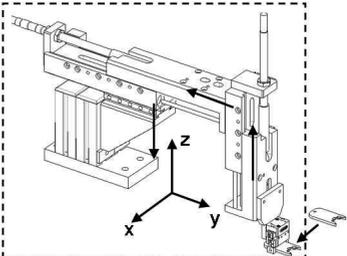
- | | | |
|----------------------|----------------------|------------------------|
| 1. Zuteiler | 2. Backengreifer | 3. Horizontalschlitten |
| 4. Vertikalschlitten | 5. Werkstückaufnahme | 6. Rundschalttisch |

Abb. 2.9: Chiphalterzuführung und Einsetzhandlung

Die Zusammenhänge innerhalb einer Funktionsfolge werden zusätzlich durch unterschiedliche Verknüpfungen der einzelnen Symbole charakterisiert. Es werden drei Fälle unterschieden. **Tabelle 2.4** zeigt diese beispielhaft mit Darstellung der zugehörigen Funktionsträger.

Tabelle 2.4: Zusammenstellung von Funktionsfolgen [VDI 2860]

Fall	Darstellung	Funktionsträger (Beispiel)
<p data-bbox="123 327 336 391">Gleichzeitig ablaufende Funktionen</p> <div data-bbox="173 470 330 550"> </div> <div data-bbox="156 582 347 702"> </div> <div data-bbox="196 941 308 1005"> </div> <div data-bbox="134 1037 369 1189"> </div>	<p data-bbox="403 327 543 534">Symbole stehen nebeneinander ohne Verbindungs-pfeile.</p>	<div data-bbox="571 327 918 598"> </div> <p data-bbox="571 630 918 805">gleichzeitiges mehrachsiges Verschieben von Werkstücken durch Vertikal- und Horizontal-schlitten einer Pick & Place Einheit</p> <div data-bbox="571 821 907 1085"> </div> <p data-bbox="571 1101 918 1204">gleichzeitiges Schwenken und Verschieben von Werkstücken durch Roboter</p>

Fall	Darstellung	Funktionsträger (Beispiel)
<p><i>Nacheinander ablaufende Funktionen</i></p> 	<p>Nach Ablauf geordnete Symbole sind getrennt dargestellt und mit Pfeilen verbunden.</p>	 <p>Aufeinander folgendes, mehrachsiges Verschieben von Werkstücken durch Vertikal- und Horizontalschlitten einer Pick & Place Einheit nacheinander</p>
<p><i>Gerätetechnisch zusammengefasste Funktionen</i></p> 	<p>Symbole werden durch eine Strichpunktlinie eingerahmt.</p>	 <p>Alle Bewegungen und Greifvorgänge werden durch ein Handlingsgerät mit Greiforgan realisiert.</p>

2.3 Planung von Montagesystemen

2.3.1 Methodische Planung

Die Montageplanung hängt von zahlreichen makro- und mikroökonomischen Eingangs- und Ausgangsinformationen ab [Eve02]. Eine Montageplanung umfasst dabei die unterschiedlichen Daten innerhalb des Unternehmens und auf dem Markt, wie z. B. Organisation, Technik und Arbeitskräfte bzw. Personal [Bul86], [Deu89]. Diese Daten sind Elemente des Planungsauftrages und dienen als Anforderungen, um ein Montagesystem aufzubauen. Der grundlegende Ablauf einer Montageplanung umfasst normalerweise fünf Phasen [Spi14] (s. **Abb. 2.10**).

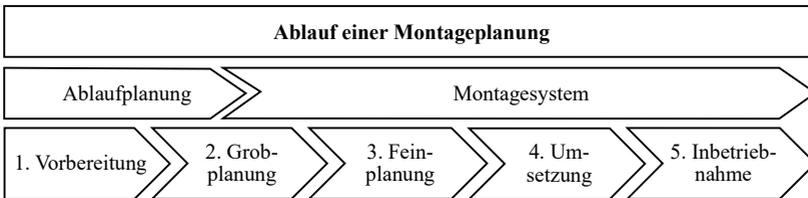


Abb. 2.10: Ablauf einer Montageplanung [Spi14]

In Hinblick auf die Montageplanung für automatische Montagesysteme wurde von H.-G. Löh [Löh77] eine methodische Vorgehensweise mit Hilfe von Funktionsfolgen entwickelt. S. Hesse [Hes89] ergänzt diese Methode zur Auswahl und Bewertung von Handhabungseinrichtungen. Für die Planung eines Montagesystems kommen auch weiteren Methoden zum Einsatz, wie [Kon03], [Lot12] usw.

Die Unterschiede zwischen den Phasen sind die Anwendungsbereiche innerhalb der Montageplanung:

Vorbereitung

Ausgangspunkt der Ziel- und Anforderungsdefinition ist im besten Fall die Analyse eines vorhandenen Montagesystems für ähnliche Produkte. So können Erkenntnisse aufgegriffen und direkt für die Grobplanung verwendet werden, um Investitionsrisiken zu minimieren. Zur Vorbereitung einer automatischen Montageaufgabe werden die folgenden Informationen benötigt:

- *Produktaufbau und Einzelteile*: Für die Ermittlung einzelner Handhabungsfunktionen müssen die Werkstückmerkmale (Verhaltenstyp, Ruhe- und Bewegungsverhalten, physikalische Eigenschaften, geometrische Werkstückdaten etc.) analysiert werden. Mit Hilfe der definierten Beschreibung des Produktaufbaus und der Einzelteile lassen sich Handhabungsfunktionen schnell und einfach erkennen bzw. zuordnen.
- *Fügen*: Die Anwendung von Fügeverfahren hängt von den bestimmten Anweisungen des montierten Produktaufbaus ab. Für ein festgelegtes Fügeverfahren werden die technischen und physikalischen Parameter definiert.
- *Werkstückanordnung*: Die Werkstücke werden zu den Montagestationen im ungeordneten oder geordneten Zustand angeliefert.
- *Qualität*: Zur Montage eines Produktes müssen Qualitätsanforderungen berücksichtigt und erfüllt werden. Damit werden die Prüfverfahren sowie die Prüfeinrichtungen ermittelt.

Grobplanung

Die Grobplanung entspricht einem Entwurf und bestimmt die enthaltenen Montage- und Handhabungsfunktionen in Kombination mit einer Funktionsfolge:

- *Montageablaufanalyse*: Gemäß des Produktaufbaus und der Einzelteile werden das Basisteil und die zu fügenden Teile festgelegt. Im Anschluss wird die Fügerangfolge der Baugruppe sowie Einzelteile mit mehreren Fügeschritten ermittelt [Hub75].
- *Funktionsanalyse*: Ein Fügeschritt kann aus verschiedenen Funktionen, wie z. B. Fügen, Prüfen oder Handhaben, bestehen. Für die eindeutige Beschreibung von Fügeschritten bzw. der Montageaufgabe werden Funktionen verwendet.

- *Funktionsfolgeaufbau*: Basierend auf der Funktionsanalyse wird die Funktionsfolge mit Hilfe von Symbolen für die Fügerangfolge erstellt. Die Funktionsfolge beschreibt die zeitliche Folge der Einzelaktionen.
- *Layoutplanung*: Entsprechend der Funktionsfolge wird die Skizze der Montageanlage erstellt. Die Montageanlagenform hängt von dem Werkstückfluss sowie den Positionen und Orientierungen der Werkstücke im Raum ab.

Feinplanung

Zu Beginn einer Feinplanung wird die Funktionsfolge nochmals überprüft und korrigiert. Wird die montage- und handhabungsgerechte Werkstückgestaltung im Hinblick auf die Automatisierung nicht erfüllt, müssen geplante Handhabungs- und Fügevorgänge durch manuelle Montageschritte ersetzt werden. Im Bereich der Feinplanung werden die technischen Lösungen für die Funktionsfolge erarbeitet:

- *Festlegen der Arbeitsprinzipien*: Für die Auswahl von Anlagenkomponenten werden Arbeitsprinzipien, wie der Bewegungsablauf oder die Krafteinwirkung, definiert. Diese Prinzipien müssen mit der Funktionsfolge erfüllt werden [VDI2221].
- *Zusammenstellen der Gesamtlösungen*: Die systematische Lösungssuche erfolgt mit Hilfe eines morphologischen Kastens, in dem verschiedene Komponenten miteinander kombiniert werden [VDI2222]. Auf Basis einer Nutzwertanalyse nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien erfolgt die Auswahl von potentiellen Funktionsträgern [Bre89].
- *Optimieren der Gesamtlösung*: Ist eine Gesamtlösung theoretisch konfiguriert, kann diese optimiert werden. Im Rahmen der Neuentwicklung einer automatischen Montage können verschiedene Zielaktionen, z. B. Zykluszeit, Layout, Montageprozess, zeitoptimale Handhabungsprozesse usw., optimiert werden [Fer01], [Wei08].

Umsetzung und Betrieb

Hauptaufgabe ist die Beschaffung, Fertigung, Montage und Inbetriebnahme des Montagesystems. Zum Vermeiden oder Einschränken von Störungen im automatischen Montagesystem wird die Störungsursache durch ein Prüfsystem erkannt und dann durch ein Steuerungssystem beseitigt.

2.3.2 Auswahl von Funktionsträgern

Für die Montage eines Produkts kommen unterschiedliche technische und gestalterische Einflüsse zum Tragen. Beispielsweise werden automatisierte Montageanlagen für Produkte mit meist hoher Stückzahl entworfen, gebaut sowie kontinuierlich weiterentwickelt. Derartige Montageanlagen sind auf einem entsprechend hohen Entwicklungsstand. Dies führt zu einer zunehmenden Modularisierung von Komponenten und Verfahren. Um Kosten zu senken und die Einsatzfähigkeit zu steigern, werden spezialisierte Anlagenkomponenten für häufig anzutreffende Funktionen hergestellt [Kra99], [Lof01].

Das Produktportfolio zahlreicher Firmen, wie z. B. von *Schunk*, der *Zimmer Group*, *Festo* oder *Bosch*, beinhaltet standardisierte Anlagenkomponenten, deren technische Daten in entsprechenden Katalogen oder Datenbanken hinterlegt sind. Zu diesen Daten gehören hauptsächlich Baugröße, Verfahrensbereiche, Tragkräfte, Wiederholgenauigkeiten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie die mögliche Taktzeiten. Abgerundet werden diese technischen Spezifikationen mit der Bereitstellung von komponentenbezogenen 3D-CAD-Daten. Somit wird eine Konfiguration der Komponenten im Vorfeld vereinfacht und der Aufbau in projektierender Arbeitsweise ist möglich und erspart somit wertvolle Entwicklungszeit und Kosten.

Um die Montage- und Handhabungsfunktionen in der Montageplanung umzusetzen, werden oft Funktionsträger eingesetzt, welche gleichzeitig mehrere Funktionen realisieren. Ein starker Trend im Anlagenbau ist der Einsatz standardisierter Baugruppen, um Durchlaufzeiten und die Komplexität der Konstruktion, Montage sowie Inbetriebnahme der Montageanlagen zu reduzieren [VDI2221]. Die technischen Kataloge bieten für jede Funktion mehrere Lösungen [Rot01]. Ausgehend von der Montageaufgabe umfasst eine Montagestation nicht nur das Montieren, Handhaben bzw. Prüfen, sondern auch Informationen über das Montageobjekt. Um geeignete Anlagenkomponenten

auszuwählen, müssen Kriterien definiert werden, wie z. B. Typen, Kapazität, Preis, Effektivität und Service [Röm14]. Die Priorität bei einer Wunschanlage liegt nicht nur bei kleinsten Zykluszeiten, sondern auch bei einem optimalen Preis- und Leistungsverhältnis [Sau94]. Eine Orientierungshilfe bei der Komponentenauswahl liefert S. Hesse [Hes93] mit einer Baukastenauswahl und damit verbundenen Einflussfaktoren (s. **Abb. 2.11**).

Montageobjekt: Werkstückmerkmale sind ein entscheidender Faktor für die Ermittlung von Funktionsfolgen und die Auswahl von Funktionsträgern. Die Werkstückgestaltung definiert, ob das Einzelteil oder die Baugruppe manuell, hybrid oder automatisch montiert werden kann.

Fügen: Die weiterführende Entwicklung einer Montageanlage orientiert sich insbesondere an den kinematischen und kinetischen Anforderungen der Füge- und Handhabungsaufgaben. Beispielsweise wird beim Fügen durch Einpressen der Fügeablauf mit Hilfe einer definierten linearen Bewegung und Presskraft durchgeführt [Rex17]. In einer automatisierten Montage ist eine Prozessüberwachung unter Betrachtung des Kraft-Weg-Verlaufs unbedingt nötig, um beispielsweise die Qualität zu sichern.

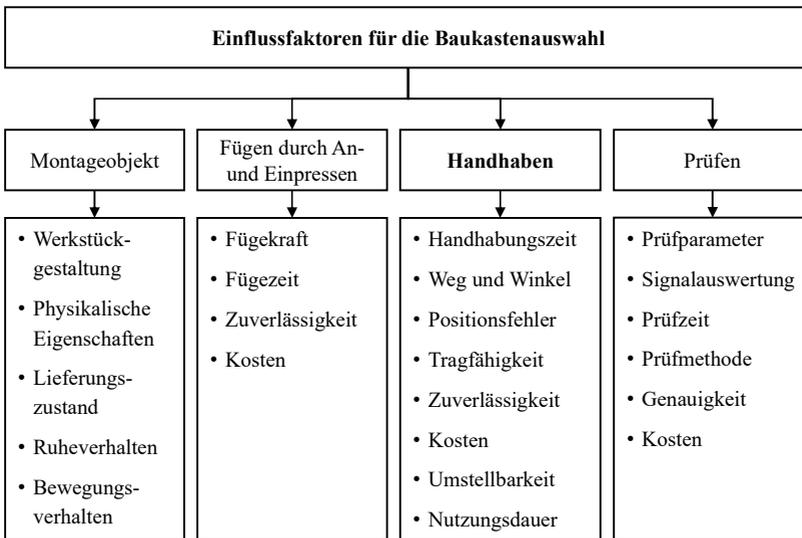


Abb. 2.11: Einflussfaktoren für die Baukastenauswahl [Hes93]

Montageobjekt: Werkstückmerkmale sind ein entscheidender Faktor für die Ermittlung von Funktionsfolgen und die Auswahl von Funktionsträgern. Die Werkstückgestaltung definiert, ob das Einzelteil oder die Baugruppe manuell, hybrid oder automatisch montiert werden kann.

Fügen: Die weiterführende Entwicklung einer Montageanlage orientiert sich insbesondere an den kinematischen und kinetischen Anforderungen der Füge- und Handhabungsaufgaben. Beispielsweise wird beim Fügen durch Einpressen der Fügeablauf mit Hilfe einer definierten linearen Bewegung und Presskraft durchgeführt [Rex17]. In einer automatisierten Montage ist eine Prozessüberwachung unter Betrachtung des Kraft-Weg-Verlaufs unbedingt nötig, um beispielsweise die Qualität zu sichern.

Handhaben: Es hängt von dem Funktionsträger ab, welche Auswahlkriterien beachtet werden müssen. Zum Beispiel sind bei der Funktion "Verschieben" die Kriterien: Weg, Bewegungszeit bzw. Maximalgeschwindigkeit, Verschiebkraft sowie Wiederholgenauigkeit hinterlegt [Sch17]. Ausgehend von den Anforderungslisten werden die Funktionsträger als Anlagenkomponenten am Markt gesucht oder bei einem Anbieter bzw. Hersteller angefragt.

Prüfen: Für jede Aufgabe werden zugehörige Prüfmerkmale am Produkt festgelegt und passende Prüfmethode gewählt. Um die Kontrollzeit zu verkürzen, hat sich die optische Messtechnik in der praktischen Anwendung zunehmend etabliert [Pfe09]. Ausgehend von den Kontrollkriterien, wie Prüfposition, Prüfbjunkt usw., lassen sich die Prüfgeräte unterscheiden.

2.4 Taktzeit einer automatischen Montageanlage

2.4.1 Taktzeitermittlung einer Station

Die Taktzeit ist ein wesentlicher Faktor eines Montagesystems und definiert dessen Soll-Leistung [Alt09]. Zur Bestimmung der Vorgabezeiten im Montageablauf stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Die wesentlichen Methoden nach H.-J. Bullinger [Bul86] sind: "Schätzen", "Planzeitwert" und "Systeme vorbestimmter Zeiten". Die Auswahl der geeigneten Methode zur Bestimmung der Vorgabezeit hängt von den zu planenden Montageprodukten ab:

- Planzeitwert: Wenn ähnliche oder gleiche Montageprodukte vorhanden sind, wird das Planzeitwertverfahren angewendet. Um die Vorgabezeit zu ermitteln, muss der Montageplaner die relevanten Einflussgrößen und deren Höhe andeuten.
- Schätzen: Wenn Zeitaufnahmen teuer oder nicht möglich sind, wird die Vorgabezeit geschätzt, was jedoch in Abhängigkeit von der Erfahrung des Montageplaners viele Unsicherheiten bergen kann. Um bessere Ergebnisse mit dieser Vorgehensweise zu erzielen, kann der Montageablauf in verschiedene Teilschritte zerlegt werden.
- Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ): Diese Methode teilt einen Montagevorgang in fünf Grundbewegungen, wie Fügen, Loslassen, Hinlangen, Greifen und Bringen. Die bekannteste SvZ-Methode ist Methods-Time Measurement (MTM). Durch die Festlegung der Normalzeitwerte für die Grundbewegungen und die Zuordnung der entsprechenden Zeit wird die Vorgabezeit für die einzelnen Montagevorgänge ermittelt.

Zur Taktzeitermittlung der Stationen durch SvZ müssen die Einzelschritte im Zyklus jeder Station ermittelt werden. Diese Einzelschritte bestehen aus verschiedenen Aktionen, wie Bewegen mit oder ohne Last, Greifen, Prüfen, Halten, Fügen etc. [Bok12]. Der Zyklus einer Station kann durch eine Tabelle oder ein Weg-Zeit-Diagramm beschrieben werden [Kon03]. Die Ausführungszeiten der Einzelschritte werden gemessen oder aus den technischen Katalogen entnommen. Aus dem Weg-Zeit-Diagramm lässt sich erkennen, ob die vorgegebene Taktzeit überschritten wurde. Dadurch können die Abläufe der Einzelschritte angepasst werden [VDI3260]. Für eine Montageanlage mit z. B. fünf Stationen werden die fünf Weg-Zeit-Diagramme erstellt. Ein Beispiel für die Funktionsfolge und das Weg-Zeit-Diagramm der Station 1 wird in **Abb. 2.12** gezeigt.

Das Teil 1 ist das Basisteil und wird, ebenso wie Teil 2, in einem Magazin gespeichert. Während der Rundscharltisch dreht, entnimmt ein Roboter das Teil 1. Bevor der Roboter Teil 1 dem Werkstückträger übergibt, muss der Rundscharltisch stillstehen. Der Roboter führt Teil 2 zu und fügt es anschließend in Teil 1.

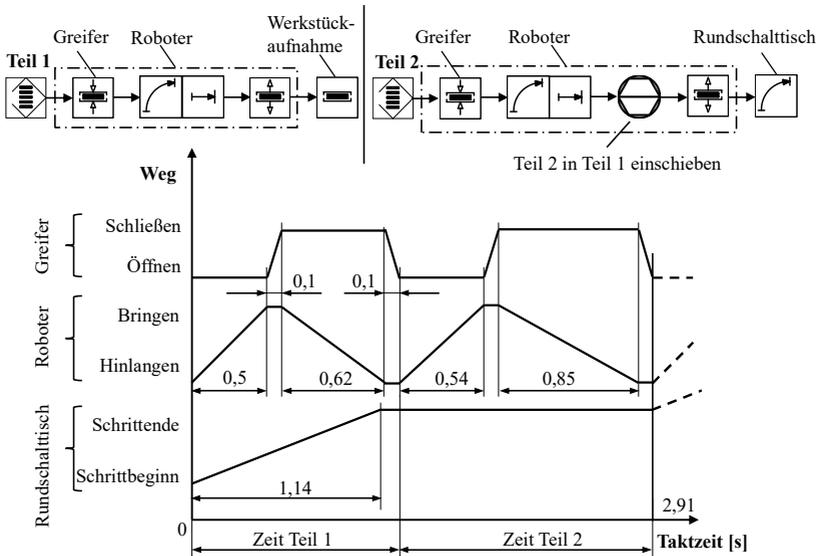


Abb. 2.12: Beispielhaftes Weg-Zeit-Diagramm der Station 1

Durch die Beschreibung der Abläufe des Roboters mit Greifer und des Rundschalttisches sowie die Festlegung der Ausführungszeiten lässt sich das Weg-Zeit-Diagramm erstellen. Analog zu der Taktzeitermittlung für Station 1 (T_1) können die Taktzeiten der Station 2 bis Station 5 (T_2, T_3, T_4, T_5) bestimmt werden. Somit wird die Taktzeit der Anlage T durch die langsamste Station definiert.

$$T = \max \{T_\sigma\}, \quad T_\sigma = T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 \quad (2.1)$$

2.4.2 Minimierung der Taktzeit von Anlagen

Die Minimierung der Taktzeit T ist ein wichtiger Schritt bei der Planung und Auslegung eines Montagesystems. Durch die Minimierung der Taktzeit können unterschiedliche Zielgrößen erreicht werden [Prö15]:

- Maximierung der Produktion und des Gewinns

- Maximierung der Wirksamkeit der Montagelinie
- Minimierung der Herstellungskosten

Um eine Baugruppe oder ein Produkt in einer getakteten Montagelinie zu montieren, werden die Montage- und Handhabungsvorgänge den verschiedenen Stationen zugeordnet. Aufgrund der unterschiedlichen montierten Erzeugnisse mit den verschiedenen Montage- und Handhabungsvorgängen, ergeben sich Zeitunterschiede zwischen den Stationen [Hal12]. Zum Vergleich der Taktzeiten einzelner Stationen soll das Taktzeitdiagramm erstellt werden [Geo16]. Das Taktzeitdiagramm (s. **Abb. 2.13**, vor Austaktung) zeigt die Station mit der maximalen Taktzeit, sie ist die sogenannte Engpassstation. Die großen Taktzeitunterschiede zwischen den Stationen verringern die effiziente Auslastung in der Montageanlage. Die Montage- und Handhabungsvorgänge in den Stationen mit Kurztaktzeiten müssen auf diejenigen mit Langtaktzeiten warten [Gru13].

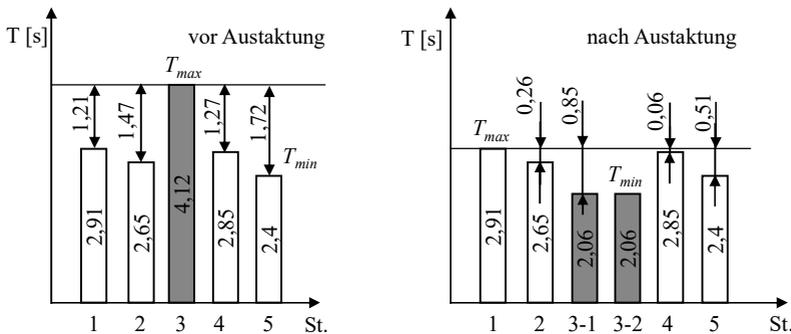


Abb. 2.13: Taktzeitdiagramm einer Montageanlage

In Bezug auf die Reduzierung der unterschiedlichen Stationszeiten und Beseitigung der Engpassstation können die folgenden Methoden angewendet werden:

Ausgleich der Taktzeit

Im Rahmen des Ausgleichs von unterschiedlichen Taktzeiten zwischen den Stationen in der Fließmontage werden die Montage- und Handhabungsvor-

gänge den Stationen zugeordnet. Um sie zuzuteilen, werden die Vorgabezeiten der einzelnen Montage- und Handhabungsvorgänge benötigt und die erforderliche Leistung berücksichtigt [Prö15]. Gemäß der Abb. 2.13 beträgt die maximale Taktzeit der Station 3 $T_{max} = 4,12$ s. Um diese Taktzeit zu verringern, kann die Station 3 in zwei Parallelstationen (Station 3-1 und Station 3-2) umgestaltet werden (s. Abb. 2.13, nach Austaktung). Somit lässt sich die Taktzeit T_{max} senken und Zeitunterschiede zwischen den Stationen ausgleichen [Lot12].

Um die Montage- und Handhabungsvorgänge den Stationen zuzuteilen, muss eine Vielzahl an Rahmenbedingungen beachtet werden [Prö15]:

- **Ablaufbedingungen:** Die Ablaufbedingungen definieren die Eingangs- und Ausgangsbedingungen bzw. die Beziehungen zwischen Vorgängen, wie zeitliche Abständen zwischen Montagevorgängen sowie Füge- und Handhabungsrangfolgen. Die Ablaufbedingungen sind die Hauptkriterien zur Aufteilung der Vorgänge im Montagesystem.
- **Stationsrestriktionen:** ein Montage- und Handhabungsvorgang kann einer bestimmten Station zugeordnet werden. Somit werden die Werkstücke aus den Bereitstellplätzen nur an eine bestimmte Station durch die Handhabungsfunktionen übergeben.
- **Zeitliche Unterbrechung zwischen Vorgängen:** Während der Montage eines Produkts gibt es die Möglichkeit zwischen den Montage- und Handhabungsvorgängen eine erforderliche Wartezeit zum Kühlen, Trocknen oder Wärmen einzufügen.

Folgen der Ausführung dieser Rahmenbedingungen sind häufig Zeitunterschiede zwischen den Stationen (s. Abb. 2.13 nach Austaktung).

Beseitigung der Engpassstation

Um die Leistung des Montagesystems zu steigern soll die Zeitdifferenz zwischen den Stationen weiter reduziert werden. Zur Reduzierung werden die folgenden Methoden untersucht:

- Reduzierung der Wege: Ein Werkstück kann durch unterschiedlich ablaufende Bewegungsfunktionen innerhalb einer Station übergeben werden. Bei der Reduzierung dieser Wege werden die Bewegungszeiten gesenkt.
- Vermeidung der unnötigen Bewegungen während des Montage- und Handhabungsprozesses: Ausgehend von dem montierten Produkt werden die Einzelmontagevorgänge sowie Handhabungsfunktionen analysiert. Somit werden die notwendigen Bewegungen beim Fügen und Handhaben bestimmt [Lot12].
- Reduzierung der Handhabungszeit: Beim Verwenden von Funktionsträgern mit höherer Geschwindigkeit und Beschleunigung lässt sich die Taktzeit der Station verringern [Lea17].

Beziehung zwischen den Anschaffungskosten und der Taktzeit einer Anlagenkomponente

Für einzelne Anlagenkomponenten (Funktionsträger) existieren unterschiedliche Anbieter mit teils stark variierenden Preisen am Markt, wobei dies nicht zwangsweise das entscheidende Kriterium für die Auswahl ist. Informationen, wie Wartungsintervalle, Zahlungskonditionen, technische Daten, Betriebskosten etc., spielen eine ebenso entscheidende Rolle. Mit Blick auf die rasante technologische Entwicklung im Umfeld der Montage- und Handhabung sind die Hersteller gezwungen, ihren Kunden einen schnellen und einfachen Zugang zu den Produktinformationen zu ermöglichen. So werden nicht nur technische Parameter in Online-Katalogen bzw. Datenbanken zur Verfügung gestellt, sondern auch die CAD-Daten der Komponenten zur Unterstützung der virtuellen Anlagenplanung.

Das enorme Spektrum an Greifmodulen, Dreh- und Schwenkeinheiten, Linearmodulen, Bildverarbeitungslösungen, Roboterzubehör usw. bedingt eine hohe Anzahl von Funktionsparametern. Die korrekte Auswahl eines Funktionsträgers für eine Montageanlage erfordert somit einen genauen Vergleich aller technischen und wirtschaftlichen Kennwerte.

So findet man beispielsweise bei der Suche nach Linear-Transfersystemen mehrere Lösungsvarianten mit unterschiedlichen Wirkprinzipien, z. B.

- Pneumatikachsen,
- Zahnriemenachsen,
- Spindelachsen und
- Linearmotorachsen.

Diese Systeme realisieren zwar die gleiche Funktion, besitzen dabei aber unterschiedliche Taktzeiten und Kosten. Für den Vergleich dieser wichtigsten Parameter müssen Linear-Transfersysteme mit gleicher Nutzlast und gleichem Hub ausgewählt werden, wie durch W.-D. Goedecke [Goe04] beschrieben. In seinem Beispiel besitzen diese Funktionsträger einen Hub von 400 mm und eine Nutzlast von 3,5 kg. Das Ergebnis seines Vergleiches ist in **Abb. 2.14** dargestellt.

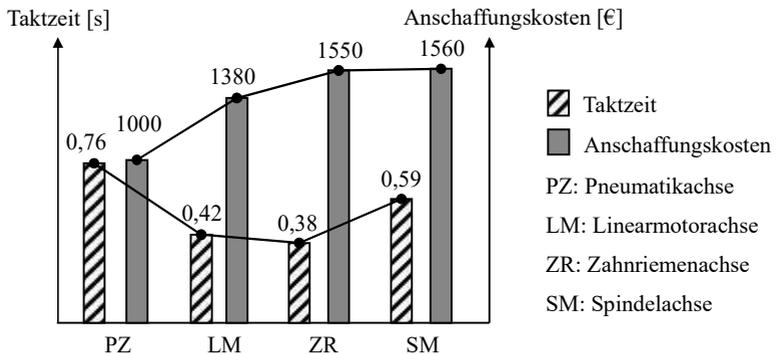


Abb. 2.14: Taktzeit und Anschaffungskosten von Linearmodule im Vergleich [Goe04]

Pneumatikachsen zeichnen sich laut [Goe04] durch hohe Taktzeiten aber auch durch niedrige Anschaffungskosten aus. Im Vergleich zu Zahnriemenachsen, welche die kleinsten Taktzeiten aufweisen aber die nahezu höchsten Anschaffungskosten erfordern, setzt man die Pneumatikachsen bei Anwendungen ein, welche einen Kompromiss aus Taktzeit und Kosten dar-

stellen. Andererseits verwendet man Zahnriemenachsen, wenn geringe Taktzeiten gefordert sind und hohe Anschaffungskosten akzeptiert werden können.

2.5 Methoden der linearen Optimierung

2.5.1 Mathematische Formulierung

Optimierungsstrategien werden heutzutage häufig in verschiedenen Bereichen eingesetzt, wie z. B. in Geschäftsbetrieben der Branchen Maschinenbau, Informatik, Physik, Chemie usw. In einem Optimierungsproblem werden die Werte der Variablen gesucht, welche zu einem optimalen Wert der Zielfunktion führen [Cav13]. Zur Lösung eines Optimierungsproblems können unterschiedliche Methoden verwendet werden. Für eine Klassifikation wird die Optimierung in drei Großbereiche aufgeteilt: Versuchsplanung, Optimierungsalgorithmus und Robust Design (s. **Abb. 2.15**).

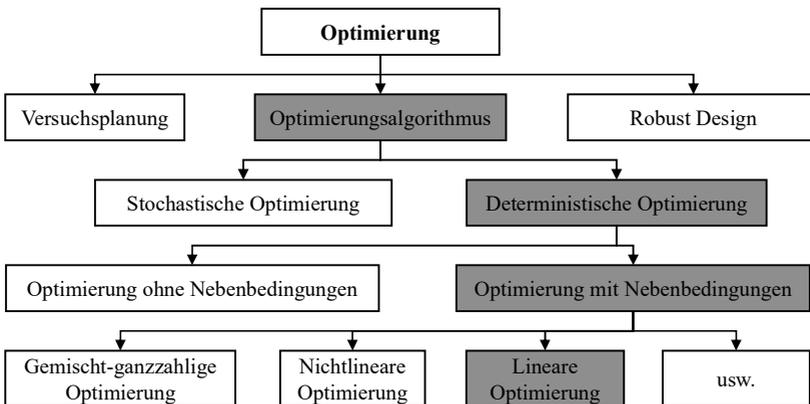


Abb. 2.15: Untergliederung der Optimierung [Cav13]

Der Optimierungsalgorithmus ist ein Kriterium für die mathematische Formulierung eines Optimierungsproblems. Eine deterministische Optimierung umfasst den starren mathematischen Ablaufplan und erlaubt keine zufälligen Elemente. Sie unterscheidet sich in Optimierung mit oder ohne Nebenbedingungen [Hel09]. Eine Auswahl des passenden Algorithmus hängt von der Art

des Optimierungsproblems ab [Cav13]. In der linearen Optimierung ist die Zielfunktion linear und durch Nebenbedingungen, Gleichungen oder Ungleichungen, eingeschränkt [Ven10], [Bau13].

Um das Optimierungsproblem zu lösen, muss eine geeignete mathematische Formulierung aufgestellt werden. Im Optimierungsproblem werden eine Menge X und eine Funktion $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Somit wird das Minimum bzw. das Maximum von $f(\mathbf{x})$ unter der Nebenbedingung $\mathbf{x} \in X$ gesucht. Ein Optimierungsproblem umfasst Eingangsparameter und -variablen sowie Zielfunktionen mit oder ohne Nebenbedingungen [Ger13]. Gemäß der Aufgabenstellung wird ein Wert, eine Funktion oder eine binäre Entscheidung gesucht [Pap15].

wobei:

$X \subseteq \mathbb{R}^n$, beliebige nichtleere Menge der reellen Zahlen \mathbb{R}

$f: X \rightarrow \mathbb{R}$, eine beliebige Funktion,

Die Funktion $f(\mathbf{x})$ ist Zielfunktion

Der Vektor \mathbf{x} ist ein euklidischer Vektorraum und ist Entscheidungsvariable

Lineare Optimierung

Lineare Optimierung spielt eine wichtige Rolle in der Industrie. Maximale Gewinne und minimale Herstellungskosten sind entscheidend für den Erfolg im Wettbewerb [Hau96]. In einer linearen Optimierungsaufgabe wird das Maximieren oder Minimieren ein oder mehrerer Zielfunktionen angestrebt. Diese beziehen sich auf gegebene Mengen, deren Elemente meist die Produkte der angestrebten Optimierung darstellen [Mär11].

Um ein lineares Optimierungsproblem zu lösen, muss eine Optimierungsaufgabe mit den Standardgleichungen (2.2) und (2.3) formuliert werden. Diese Optimierungsaufgabe enthält die gegebenen Daten a_{ij} , b_i , c_j und Entscheidungsvariablen x_j [Jun15], [Bra77].

$$\min \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \quad (2.2)$$

Die Entscheidungsvariablen geben häufig Dinge vor, welche man anpassen oder kontrollieren kann, z. B. Produktionsmengen in Produktionsplanungsproblemen. Die Nebenbedingungen beschränken die Variablen, um mögliche Lösungen darzustellen [Chi15].

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \begin{pmatrix} \leq \\ = \\ \geq \end{pmatrix} b_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.3)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

In der Produktionsplanung hat ein Unternehmen häufig die Produktionsmengen für mehrere Produkte zu bestimmen, z. B. Arbeitszeit, Maschinen, Menge der einzelnen Produkte usw. Ziel der Optimierung ist die Maximierung des Gesamtgewinns. In diesem Fall müssen alle Entscheidungsvariablen nur ganzzahlige Werte zulassen ($x_j \in \mathbb{Z}_+$). Somit ist diese lineare Optimierung eine ganzzahlige, lineare Optimierung [Hel14].

In vielen praktischen Situationen müssen Entscheidungen getroffen werden, ob ein Objekt aus einer gegebenen Menge ausgewählt werden soll oder nicht. Deshalb nimmt die Variable x_j nur die Werte 1 (ausgewählt) oder 0 (nicht ausgewählt) an ($x_j \in \{0; 1\}$). Dies ist eine sogenannte binäre, lineare Optimierungsaufgabe oder eine lineare 0-1 Optimierungsaufgabe [Sch13]. Das Optimieren vergleicht die verschiedenen Auswahlmöglichkeiten und zeigt, welche am besten geeignet sind [Was16].

Beispiel für lineare Optimierung

Ein mathematisches Modell des linearen Optimierungsproblems wird durch ein einfaches Beispiel gezeigt. Eine Firma montiert zwei Produkte P_1 und P_2 aus den Bauteilen BT_1 und BT_2 . Das Produkt P_1 benötigt vier Bauteile BT_1 und zwei Bauteile BT_2 , das Erzeugnis P_2 ein Bauteil BT_1 und fünf Bauteile BT_2 . Die vorhandenen Einheiten des Bauteils BT_1 betragen 80 Stück und von Bauteil BT_2 120 Stück. Der Gewinn beim Verkauf von Produkt P_1 und P_2 ist je 3 und 5 Einheiten. Das Optimierungsproblem ist die Anzahl der Produkt P_1 und P_2 zu finden, um den Gewinn zu maximieren. Die vorgegebenen Parameter werden in **Tabelle 2.5** gezeigt.

wobei:

a_{ij} : Menge an Bauteilen BT_i zur Montage einer Einheit des Produkts P_j

b_i : vorhandenen Einheiten aller Teile in der Firma

c_j : Gewinne des Produkts P_j

x_j : Entscheidungsvariablen (Anzahl von Produkt P_1 und P_2), um den maximale Gewinn zu erreichen

Tabelle 2.5: Eingangsparmeter für Optimierungsaufgabe

	Produkt P_1	Produkt P_2	vorhandene Einheiten " b "
Bauteil BT_1 (a_{1j})	4	1	80
Bauteil BT_2 (a_{2j})	2	5	120
Gewinn " c "	3	5	

Das **Ziel des Optimierungsproblems** ist der maximale Gewinn der Verkaufsprodukte P_1 und P_2 . Somit wird das Optimierungsproblem formuliert:

$$\max f(x_1, x_2) = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j = 3 \cdot x_1 + 5 \cdot x_2 \quad (2.4)$$

Die **Nebenbedingungen für dieses Optimierungsproblem** werden durch die Gleichungen (2.5), (2.6), (2.7) festgelegt:

Die **vorhandenen Einheiten b_1** sind kleiner oder gleich 80:

$$\begin{aligned} g(x_1, x_2) &= \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \leq b_i \rightarrow g(x_1, x_2) & (2.5) \\ &= 4 \cdot x_1 + x_2 \leq 80 \end{aligned}$$

Die **vorhandenen Einheiten** b_2 sind kleiner oder gleich 120:

$$\begin{aligned} h(x_1, x_2) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j &\leq b_i \rightarrow h(x_1, x_2) & (2.6) \\ &= 2 \cdot x_1 + 5 \cdot x_2 \leq 120 \end{aligned}$$

Die **Entscheidungsvariablen** sind natürliche Zahlen

$$x_1, x_2 \in \mathbb{N} \text{ — Menge der natürlichen Zahlen} \quad (2.7)$$

2.5.2 Lösungsverfahren

Ein Lösungsverfahren für lineare Optimierungsaufgaben wird nicht nur mit den Entscheidungsvariablen \mathbf{x} , sondern auch unter Beachtung der Nebenbedingungen betrachtet. Um ein lineares Optimierungsproblem zu lösen, verwendet man häufig Computersoftware. Mit Ausnahme kleinerer Probleme mit wenigen Entscheidungsvariablen sowie Nebenbedingungen wird ein Lösungsverfahren ohne Computer genutzt [Fou03]. Zur Lösung kommen verschiedene Methoden zum Einsatz [Mat16]:

- *graphische Lösungsverfahren und Fourier-Motzkin-Elimination:* Optimierungsprobleme mit zwei Entscheidungsvariablen und Nebenbedingungen sowie Nichtnegativitätsforderungen können durch ein graphisches Verfahren oder eine Fourier-Motzkin-Elimination gelöst werden.
- *Primale Simplexmethode:* Diese Methode ist heute das meistbenutzte Verfahren zur Lösung linearer Optimierungsprobleme.
- *Innere-Punkte-Methode:* Im Vergleich zur Simplexmethode wird die Innere-Punkte-Methode für sehr große Probleme genutzt. Sie ist

nicht geeignet für Optimierungsprobleme mit vielen Algorithmen der ganzzahligen Optimierung.

In diesem Kapitel wird das graphische Verfahren verwendet, um ein einfaches Optimierungsproblem aus **Abschnitt 2.5.1** zu lösen. Andere Aufgabenstellungen, wie die Minimierung von Taktzeit und Anschaffungskosten durch ausgewählte, geeignete Anlagenkomponenten aus den Datenbanken, erfordern den Einsatz der Simplexmethode.

Graphische Lösungsverfahren

Ein allgemeines Beispiel des Lösungsverfahrens zeigt **Abb. 2.16**.

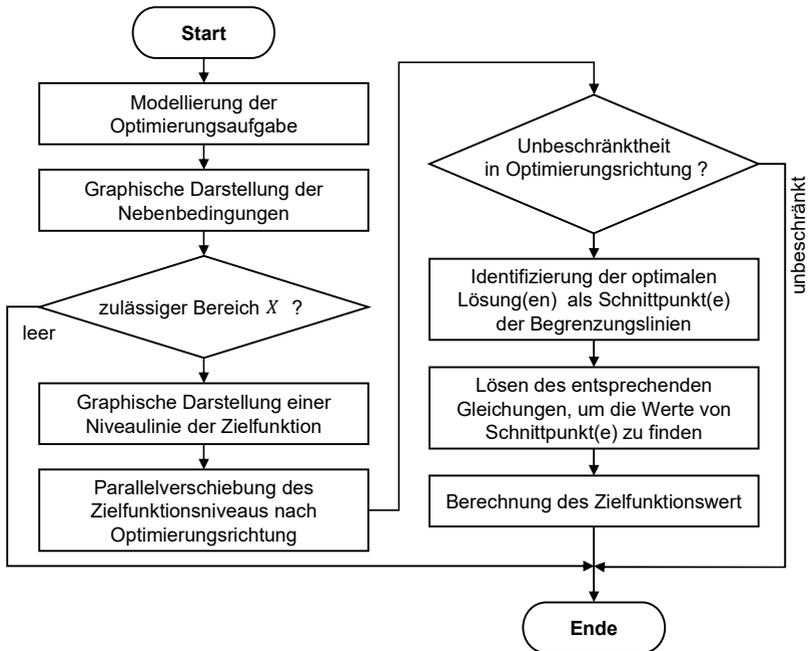


Abb. 2.16: graphisches Lösungsverfahren [Ung10]

Bei der Formulierung des Optimierungsproblems werden zu Beginn die Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen bestimmt. Diese Nebenbedingungen

werden anschließend in einem kartesischen Koordinatensystem graphisch dargestellt und der Bereich zulässiger Lösungen wird ersichtlich. In diesem Bereich wird folgend eine Niveaulinie der Zielfunktion dargestellt. Entsprechend der Optimierungsrichtung (Min oder Max) ist die Niveaulinie zu verschieben. Ist die Optimierungsrichtung unbeschränkt, so hat das Optimierungsproblem keine Lösung. Die optimale Lösung findet man in einem Eckpunkt des zulässigen Bereichs X , dem Schnittpunkt der Begrenzungslinien. Durch das Lösen des entsprechenden Gleichungssystems wird der Zielfunktionswert bestimmt.

Durch die Anwendung des graphischen Verfahrens wird nachfolgend das Beispiel aus Abschnitt 2.5.1 optimiert. Basierend auf den Nebenbedingungen $g(x_1, x_2)$, $h(x_1, x_2)$ und $x_1, x_2 \in \mathbb{N}_0$ wird der zulässige Bereich festgelegt. In diesem Beispiel liegt der zulässige Bereich:

- oberhalb der Linien x_1, x_2 und
- unterhalb Linien $g(x_1, x_2), h(x_1, x_2)$

Die Niveaulinie der Zielfunktion $f(x_1, x_2) = 3 \cdot x_1 + 5 \cdot x_2 = 15$ wird in den zulässigen Bereich eingezeichnet. Beim Verschieben der Zielfunktion $f(x_1, x_2)$ nach rechts wird der Schnittpunkt der optimalen Lösung gefunden. Dieser Schnittpunkt ist durch die Gleichungen $g(x_1, x_2) = 80$ und $h(x_1, x_2) = 120$ festgelegt (s. **Abb. 2.17**).

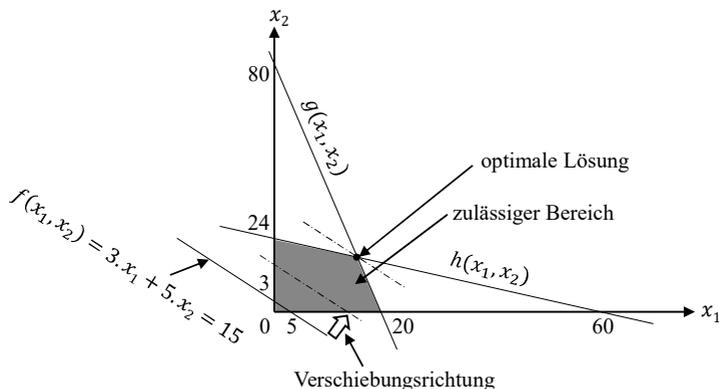


Abb. 2.17: graphische Lösung des linearen Optimierungsproblems

Beim Lösen dieser Gleichungen ergeben sich die Werte des Schnittpunkts zu:

$$x_1^* = \frac{140}{9} \approx 15, x_2^* = 18 \quad (2.8)$$

Aus den Lösungswerten x_1^*, x_2^* der Gl. (2.8) wird der Zielfunktionswert berechnet:

$$\max f(x_1, x_2) = f(15, 18) = 135 \quad (2.9)$$

Basierend auf den Gleichungen (2.8) und (2.9) sind die Anzahl von Produkt $P_1 = 15$, $P_2 = 18$ und der maximale Gewinn der Verkaufsprodukte ist 135 Einheiten. Das Beispiel zeigt, wie einfach und schnell ein lineares Optimierungsproblem mit zwei Entscheidungsvariablen gelöst und ein Optimierungsergebnis zu finden ist.

Primale Simplexmethode

Die Lösung für lineare Optimierungsprobleme wurde von G. B. Dantzig im Jahre 1947 erfunden. Die Simplexmethode hat zwei grundlegende Phasen. Die erste Phase beinhaltet die zulässige Menge. Die zulässige Menge wird durch Nebenbedingungen festgelegt. Nachdem eine zulässige Menge für das Problem ermittelt wurde, wird die Simplexmethode mithilfe iterativer Verfahren bearbeitet [Sch88]. Ist der Lösungswert errechnet, ist die Iteration beendet (s. **Anhang 9.3**).

Es gibt verschiedene Programmiersprachen, um einem Optimierungsproblem zu lösen, wie AMPL, MINOS, LINDO, EXPRESS, CPLEX usw. IBM ILOG CPLEX Optimizer ist eine Computersoftware zur Modellierung und Lösung von linearen Optimierungsproblemen. Sie besteht aus Bibliotheken zur Herstellung von Verknüpfung mit anderen Programmiersprachen, wie C, C++, C#, Java, MATHLAB, Excel und Python [Mor93]. Zur Verbesserung der Optimierungslösung interagiert CPLEX mit Tools, wie Tabellenkalkulationen in Microsoft Access und relationalen Datenbanken [IBM09], [IBM17].

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

3.1 Analyse der methodischen Planung

Die Montage- und Handhabungstechnik spielt in wertschöpfenden bzw. produzierenden Unternehmen eine entscheidende Rolle. Ziel dieser Unternehmen ist eine gewinnorientierte Ausrichtung durch die optimale Kombination der ausführenden Anlagentechnik und der organisatorischen Durchführung von Fertigungsprozessen (s. Kapitel 2.1). In diesem Spannungsfeld nimmt die Planung von Montagesystemen für die physische Gestaltung von Montageprozessen - der ausführenden Anlagentechnik - einen richtungsweisenden Stellenwert ein. Die wesentliche Aufgabe eines Montagesystems besteht demnach in der Umsetzung eines Montageprozesses zur vollständigen oder teilweisen Automatisierung von Handhabungs- und Montageschritten.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Planung und Umsetzung von Montagesystemen ist die Vorbereitung in Form einer Analyse des Produktes. Ziel ist die Ermittlung und tabellarische Dokumentation der Produkteigenschaften, des Produktaufbaus, der Merkmale und Beschaffenheit von Einzelteilen sowie deren Montage- und Qualitätsanforderungen (s. Kapitel 2.3). Mit diesen Informationen ist eine Beschreibung und Abbildung des Montagevorgangs mit Hilfe einer standardisierten Symbolsprache umzusetzen (s. Kapitel 2.2). Demnach werden definierte Montage- und Handhabungssymbole in sogenannten Funktionsfolgen logisch verknüpft, um den prozessspezifischen Material- und Informationsfluss aufzuzeigen. Mit dem Aufbau der Funktionsfolgen findet gleichzeitig eine Definition der notwendigen Handhabungsfunktionen und Funktionsprinzipien statt, die für die Auswahl bzw. Neuentwicklung der einzelnen Anlagenkomponenten zwingend notwendig sind.

Bekannte Methoden der Montageplanung für automatische Montagesysteme nach H.-G. Löhr oder S. Hesse wurden vorgestellt. Diese Methoden beziehen sich im Wesentlichen auf die standardisierte Symbolsprache als Basis einer methodischen Produktentwicklung und werden zum Teil bereits mit technischen Daten ergänzt. Dabei wird der konkrete Ablauf der Montageplanung, von der Vorbereitung bis zur Inbetriebnahme, in 5 Schritte eingeteilt und mit unterschiedlichen Daten aus wirtschaftlichen und technischen Aspekten un-

terfüttert. Für die ganzheitliche Planung und gezielte Optimierung, unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte, ist jedoch eine grundlegende Erweiterung der Symbolsprache notwendig, um die Herangehensweise an den symbolischen Anlagenentwurf durch zusätzliche Informationen und Parameter auch mathematisch eindeutig beschreibbar umzusetzen.

Tabelle 3.1: Möglichkeiten und Schwachstellen der bekannten Methode

	Gegebene Funktionalitäten	Schwachstellen
	! Unzureichende Verknüpfung der einzelnen Planungsschritte !	
Großplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung der allgemeine Funktionsfolgen und Formulierung der Montage- und Handhabungsaufgaben • Analyse der Montage- und Handhabungsvorgänge, wie Fügen, Zuführen, Ordnen usw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindung der Funktionsfolge mit den Funktionsträgern sowie der Montageanlage • Identifikation von Engpassstationen • Ortswechselplan • keine räumliche Darstellung
Feinplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Suche von Lösungen für die Funktionen aus den Produktkatalogen • Bewertung und Auswahl der Gesamtlösungen • Anordnung der Arbeitsplätze bzw. Anlagen • Simulation eines Materialflusses 	<ul style="list-style-type: none"> • detaillierte Beschreibung einer Funktionsfolge • Schnittstellendefinition zur technologischen Kopplung von Systemelementen aus der Funktionsfolge • Auswahl der Anlagenkomponenten entsprechend der minimalen Taktzeit und Anschaffungskosten

Ein qualitativer Verbesserungsbedarf für die Planung Montagesysteme wurde insbesondere bei den Schritten der Grob- und Feinplanung detektiert. Die logische Ableitung der Schwachstellen in Bezug zu den gegebenen Funktionalitäten in der bekannten Planungsmethodik werden in **Tabelle 3.1** aufgeschlüsselt.

Demnach werden mit der Grobplanung die allgemeine Montagereihenfolge definiert, Montage- und Handhabungsaufgaben zugeordnet und eine entsprechende Funktionsfolge aufgestellt. Eine genaue Betrachtung und Berücksichtigung der resultierenden Taktzeiten, vorhandenen Zeitunterschiede zwischen den Stationen und resultierender Engpassstationen erfolgt jedoch nicht. Die Möglichkeiten des Taktausgleichs, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, werden daher meist nur basierend auf Erfahrungswerten eingesetzt. Darauf aufbauend werden in der Feinplanung technische Lösungen für die eingangs definierten Funktionen ausgewählt bzw. individuell entwickelt. Auch hier bestehen keine Automatismen zur ganzheitlichen Analyse der Kostenstruktur oder gar gezielter Optimierung.

Die beispielhaft aufgezeigten Schwachstellen der bekannten Verfahren führen zum Lösungsansatz einer ganzheitlichen Methode unter Anwendung einer geschärften Symbolsprache mit parametrischen Verknüpfungen. Diese parametrischen Verknüpfungen, in Verbindung mit der konkreten Beschreibung der Zeit- und Kostenstruktur des zu planenden Montagesystems, erlauben die automatisierte Identifikation von Engpassstationen und Einsparpotentialen.

3.2 Potential bei der Planung von Montagesystemen

In Kapitel 3.1 wurden die gegebenen Funktionalitäten und Schwachstellen der bekannten Planungsmethoden aufgeführt. Demnach bestehen eklatante Schwächen in den unzureichenden Verknüpfungen und dem einhergehenden Mangel an Informationsaustausch zwischen den einzelnen Planungsschritten. Zudem bestehen keine eindeutig regulierten Verknüpfungen von Handhabungsfunktionen mit den realen Funktionsträgern. In Ermangelung realitätsnaher Parameter können keine Automatismen zur iterativen Optimierung im Ablauf der Montageplanung umgesetzt werden. Hieraus ergibt sich das wesentliche und aufgabenumfängliche Potential bei der Planung von Montage-

systemen aus dem symbolischen Lösungsansatz. Die bekannte und standardisierte Symbolsprache ist insbesondere für die Schritte der Vorbereitung, Grob- und Feinplanung zu erweitern und funktionsorientiert zu schärfen (s. **Abb. 3.1**).

Vorbereitung

In der Vorbereitung spielen insbesondere die geometrischen Formen der Handhabungsobjekte eine entscheidende Rolle, da sie die Schwierigkeit des Handhabens beeinflussen. Unter Berücksichtigung der Werkstückmerkmale, deren Position und Orientierung, lassen sich die Montage- und Handhabungsaufgaben klar und deutlich formulieren. Mit der Analyse werden die ausschlaggebenden Voraussetzungen für die parametrische Verknüpfung in der Funktionsfolge gelegt.

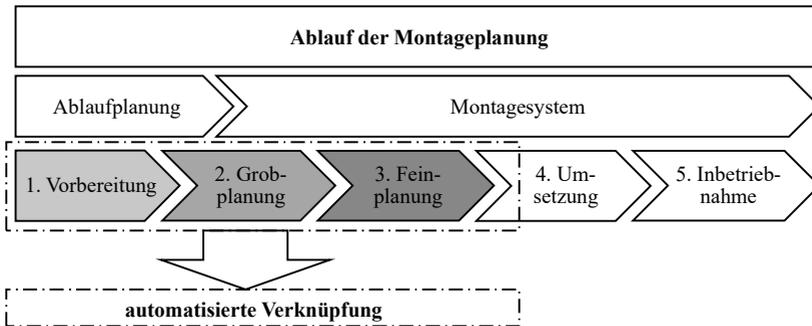


Abb. 3.1: Verbesserungspotential der bekannten Planungsmethodik

Grobplanung

Mit der Grobplanung beginnt die symbolische Abbildung der Handhabungsaufgabe auf Basis der Funktionsfolge. Für diese symbolische Abbildung bestehen neben der parametrischen Unterfütterung folgende wesentliche Verbesserungsansätze:

- **Vernetzung der Handhabungsfunktion mit dem Wirkprinzip von Funktionsträgern:** Die Funktionsfolge der bekannten Methode beschreibt eine neutrale Lösung für eine Handhabungsaufgabe, d.h. die Funktionsfolge ist unabhängig von den Funktionsträgern.

Eine offensichtliche Verbesserungsmöglichkeit bietet die einheitliche Beschreibung der Abläufe der Werkstücke und Funktionsträger durch die Funktionssymbole.

- **Erkennung der Engpassstationen:** Die bekannte Methode betrachtet nicht die Ausführungszeiten in der Funktionsfolge. Trotzdem beeinflusst die Ausführungszeit und Engpassstation die Soll-Leistung des Montagesystems.

Anzustreben ist die Ergänzung der Ausführungszeit einer Funktion.

- **Entwurf eines Ortswechselflans:** In der Grobplanung wird eine Layoutplanung eines Montagesystems erstellt. Die bekannte Methodik ordnet die Montageanlage und zugehörige Arbeitsplätze in Bezug auf den Materialfluss und die Materialbereitstellung an.

Vorteilhaft an der Methode ist, dass ein Ortswechselflan und der Werkstückfluss im Raum erstellt werden. Die Position und Orientierung von Werkstücken in einem Werkstückfluss im Vergleich mit dem Bezugskordinatensystem wird gezeigt. Somit lässt sich die Layoutplanung vom Konstrukteur einfach und schnell erstellen.

Feinplanung

Mit dem Ortswechselflan wurde der Umfang an Hauptparametern im Rahmen der Grobplanung beschrieben. Die Konkretisierung und Auswahl der Funktionsträger, deren Anordnung und taktzeitoptimalen Kombination werden, unter Berücksichtigung der Kostenstruktur, mit der Feinplanung erarbeitet und iterativ optimiert. Das Hauptpotential liegt dabei in der:

- **Detaillierten Beschreibung einer Funktionsfolge:** Um eine Anlagenkomponente exakt festlegen zu können, benötigt es weitere produktspezifische Informationen. In der Grobplanung wurde der Funktionsträger mit dem Wirkprinzip grob ausgewählt. Die Informationen über die Handhabungsfunktion, Werkstückmerkmale und das Gesamtmontagesystem sind wesentlich für die genaue Auswahl der Funktionsträger.

Es ist vielversprechend, wenn produktspezifische Parameter und quantitative Angaben zu den Funktionssymbolen hinzugefügt werden.

- **Schnittstellendefinition:** Die Handhabungsabläufe werden durch Verknüpfung zwischen den Funktionssymbolen in einen zeitlichen Kontext gestellt. Die Verbindung ist abhängig von Ablaufbedingungen, Montage- und Handhabungsreihenfolgen oder auch Ergebnissen nach Prüf- oder Messvorgängen. In der Funktionsfolge dient das Symbol als ein Kettenglied, um die funktionspezifische Lösung in deren Folge zu koppeln.

Es ist erfolgsversprechend ein parametrisches Symbol mit den Eingangs- und Ausgangsparametern zu erweitern sowie mit den Wirkprinzipien der Funktionsträger zu vervollständigen. Somit wird der Montage- und Handhabungsablauf exakt beschrieben.

- **Auswahl der optimalen Anlagenkomponenten nach Nebenbedingungen der Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten:** Basierend auf einem bereits erweiterten Funktionsumfang, werden jedem Funktionselement nun auch technologische und physikalische Parameter zugeordnet, wobei die funktionsbezogene Taktzeit und Kostenkalkulation im Vordergrund stehen. Für ein Montagesystem mit verschiedenen Stationen und Teilfunktionen gibt es zahlreiche Lösungsmöglichkeiten. Diese werden zur Auswahl bzw. zum Vergleich funktionsbezogen in einer Funktionsträgerliste (FTL) aufgeführt. Bei der manuellen Auswahl kann man die optimale Lösung im Bezug zu minimaler Taktzeit und Kosten nur mühevoll finden.

Das Entwickeln einer softwaretechnischen Applikation stellt eine zielführende Methode dar, Anlagenkomponenten schnell und optimiert zu suchen sowie auszuwählen. Das Portfolio der Anlagenkomponenten, optimiert hinsichtlich Taktzeit und Kosten, wird ausgegeben.

Mit diesen aufgedeckten Verbesserungspotentialen, bei der Planung von Montagesystemen, ergibt sich der Lösungsansatz eines integrativen Montageplanungssystems, auf Basis einer neu zu entwickelnden Symbolsprache.

3.3 Lösungsansatz eines Montageplanungssystems

Der Fokus des neuen, integrativen Montageplanungssystems soll auf den Schritten *Vorbereitung*, *Grobplanung* und *Feinplanung* liegen. Um dies zu erreichen, muss – basierend auf symbolischen Funktionsfolgen – eine neue Methodik zur Inkludierung aller wesentlichen Parameter und zur Selektion der optimalen Anlagenkomponenten entwickelt werden. Aus den bekannten Grundfunktionensymbolen wird eine erweiterte Symbolsprache entwickelt, die nun auch Informationen und Parameter der verwendeten Funktionsträger bereitstellt und zusätzlich in dreidimensionaler Form bei der räumlichen Anlagenplanung unterstützt. Für die iterative Planung mit automatisierten Verknüpfungen wird ein neues Verfahren präsentiert und im weiteren Verlauf der Arbeit spezifiziert (s. **Abb. 3.2**).

Wie bereits in Abschnitt 0 geschildert, werden in der *Grobplanung* die einzelnen Montage- und Handhabungsfunktionen erarbeitet. Ausgehend von Werkstückmerkmalen, Produktaufbau, Qualitätsanforderungen sowie dem Lieferungsordnungszustand – bekannt aus dem vorangegangenen Schritt der *Vorbereitung* – werden die primären und sekundären Montagefunktionen bestimmt. Um eine Handhabungsfunktion letztendlich umzusetzen, sind Lösungen (Funktionsträger) mit unterschiedlichen Wirkprinzipien, ausgezeichnet in der Funktionsfolge, denkbar. Dies bedingt eigene Symbole für die Funktionsträger, welche in Kapitel 4.1 näher beschrieben werden.

Eine Engpassstation erhöht die Taktzeit des Montagesystems. Zur Erkennung eines solchen "Flaschenhalses" werden die geschätzten Ausführungszeiten in den Funktionsfolgen hinterlegt, was wiederum eine Aufteilung der Arbeitsinhalte bzw. Handhabungsfunktionen auf andere Stationen ermöglicht. Kapitel 5.1 illustriert diese Vorgehensweise.

Um eine Montageanlage aufzubauen, ist eine Überprüfung der Abmessungen und der Durchlaufzeiten des Werkstückflusses, der Soll-Leistungen etc. erforderlich. Im Hinblick auf die Beschreibung der Handhabungsabläufe im

Raum unterstützen die neuen 3D-Symbole den Entwickler bei der Erstellung der Ortswechselläne (s. Kapitel 4.3 und 4.4).

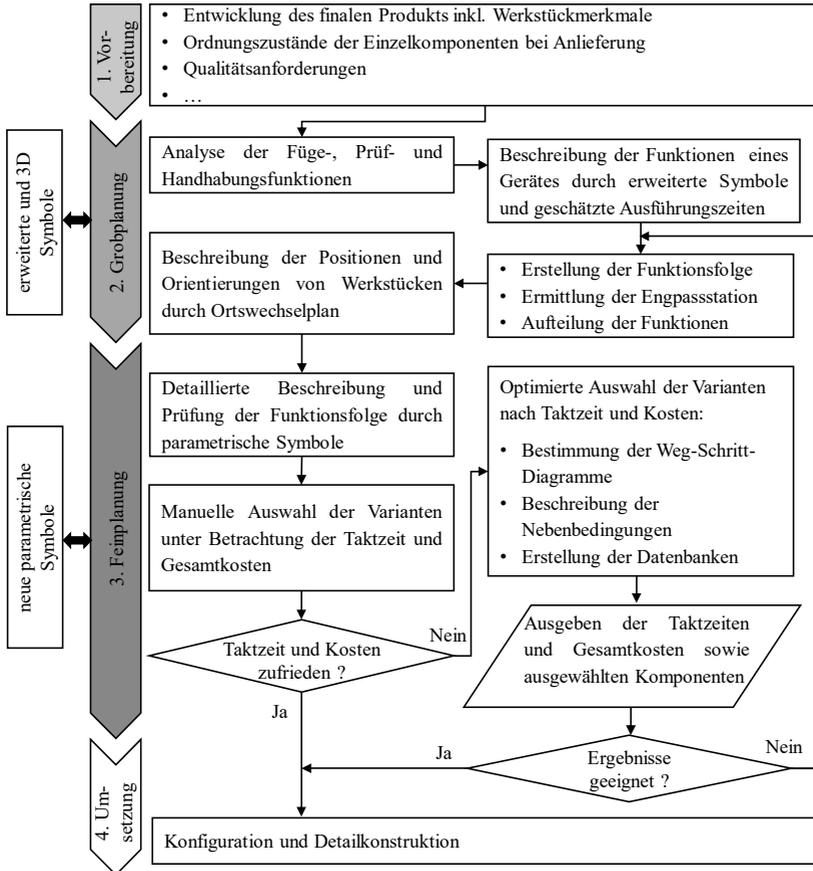


Abb. 3.2: Lösungsansatz für ein neues Montageplanungssystem

In der *Feinplanung* werden die konkreten Funktionsträger erarbeitet. Um die geeigneten Funktionsträger zu ermitteln, werden FTL basierend auf den Anforderungslisten verwendet. Diese neuen parametrischen Listen-Symbole enthalten Informationen über die Symbolfunktion (s. Kapitel 4.2). Jedes parametrische Symbol enthält Eingangs- und Ausgangsparameter. Sie dienen

als technische Kopplung von Symbolelementen in der Funktionsfolge. Ausgehend von den Informationen in den Symbolen werden die Anforderungslisten für Funktionsträger erstellt. Somit werden die FTL für jede Funktion gesucht.

Durch diese Deklaration von Kenndaten in der FTL lässt sich eine Engpassstation bereits beim Anlagenentwurf, wobei in diesem Fall ggf. auch geschätzte Taktzeiten und Erfahrungswerte einfließen können, genauer und schneller herausfinden. Die manuelle Auswahl aus der FTL, mit vorgegebenen Bedingungen wie den Gesamtanschaffungskosten und der Taktzeit, ist zeitaufwendig und besonders bei großen Systemen mit verschiedenen Stationen und Funktionsträgern mühevoll (s. Kapitel 5.2). Diese Arbeit bietet eine programmtechnische Lösung für das Optimierungsproblem (s. Kapitel 5.3). Basierend auf der Programmierung werden die Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten bewertet. Sind die Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten nicht geeignet, können folgende Methode angewendet werden:

- Ist die Taktzeit höher als die Soll-Taktzeit, werden neue Funktionsfolgen erstellt. In diesem Fall können die Funktionen der Engpassstation verteilt oder die Werkstückwege verkürzt werden.
- Sind die Gesamtanschaffungskosten höher als erwartet, werden neue FTL erstellt und das Optimierungsprogramm erneut ausgeführt.

Aus den Optimierungsergebnissen werden die Funktionsträger ausgewählt und basierend auf dem Ortswechselfplan die Montageanlage konfiguriert und angepasst. Ausgehend von der Montageaufgabe wird eine optimierte Lösung am Beispiel des Rundtaktautomaten gezeigt. Eine detaillierte Lösung findet sich in Kapitel 6.

4 Entwicklung der neuen Symbolsprache

4.1 Konkretisierung und Erweiterung bekannter Funktionen

4.1.1 Funktionssymbole für Werkstücke und Werkzeuge

Zur vollständigen Beschreibung einer Montage- und Handhabungsaufgabe durch eine Funktionsfolge sind die bekannten Symbole nicht genügend informativ. Aus diesem Grund sollen in Funktionsfolgen zukünftig auch die Wirkprinzipien von Funktionsträgern dargestellt werden. Dies unterstützt u.a. auch die passende Auswahl nachfolgender Funktionen. Voraussetzung ist aber die Erweiterung der aktuellen Handhabungssymbole für Werkstücke und die Schaffung neuer Symbole für Werkzeuge/Funktionsträger.

Die gezielte Bewegung eines Werkstücks kann entsprechend seiner Freiheitsgrade entweder als Translationen oder als Rotationen definiert werden. Die Realisierung dieser Bewegungen erfordert die Auswahl eines entsprechenden Handhabungsgerätes. Dabei muss zusätzlich unterschieden werden, ob die Bewegung fortlaufend, oszillierend oder schrittweise erfolgen soll. Ausgehend von den translatorischen und rotatorischen Bewegungen des Werkstücks ergeben sich für die Bewegungen der Funktionsträger sechs unterschiedliche Fälle [Hes13] und somit sechs neue Symbole. Zur Spezifizierung der neuen Symbole wird zusätzlich das Antriebsprinzip mit Abkürzung A, der Bewegungsablauf und das Arbeitsprinzip der Funktionsträger betrachtet. Die detaillierte Beschreibung der neuen Symbole von Funktionsträgern findet sich in Anhang 9.1.3. **Abb. 4.1** zeigt beispielhaft sechs Sinnbilder der Funktionsträger. Im Vergleich mit den bekannten Symbolen ermöglichen diese Symbole eine direkte Kopplung zwischen der Funktion und dem Funktionsträger [Ngu15a].

In den zurückliegenden Jahren wurden verschiedene Symbolsprachen geschaffen, um fast alle Handhabungsaufgaben zu formulieren. Dabei wird vor allem die Funktion "Pick & Place" sehr häufig in der automatischen Handhabung verwendet. Das Werkstück kann sich hierbei in der Ebene oder im Raum bewegen. Es erscheint somit sinnvoll, hierfür spezielle Symbole, als Zusammensetzung mehrerer "Verschiebe und/oder Drehe"-Operationen, zu

erstellen (s. **Anhang 9.1.2**). Basierend auf den Antriebsprinzipien, Bewegungsabläufen und Arbeitsprinzipien wurden neue Symbole zur Ermittlung der Funktionsträger (Werkzeuge) geschaffen (s. **Anhang 9.1.3**).

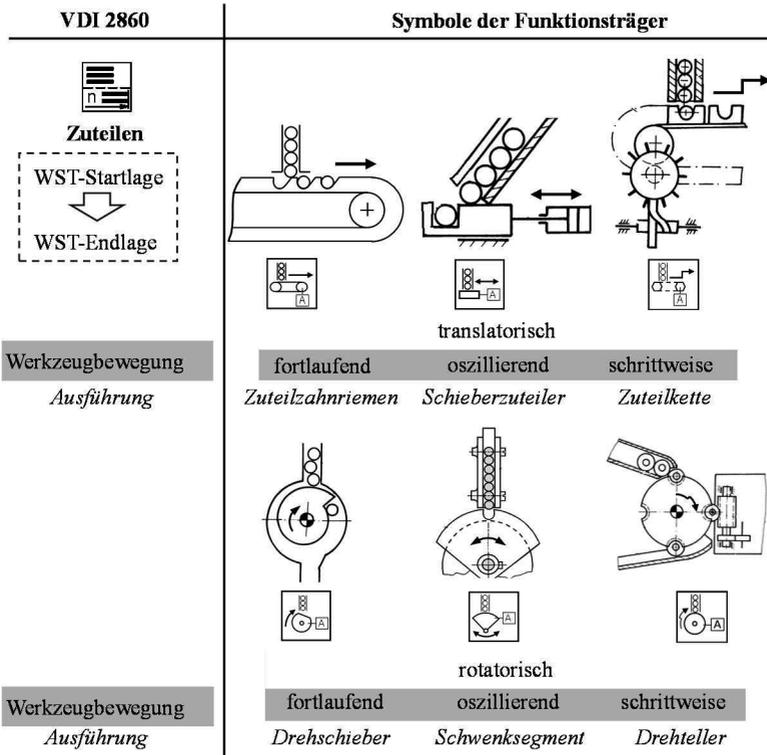


Abb. 4.1: Symbole für die Funktionsträger (Bilder nach [Hes13])

4.1.2 Kombinationssymbolen "Werkstücke und Funktionsträger"

Zur Realisierung einer Handhabungsfunktion können verschiedene Funktionsträger mit unterschiedlichen Wirkprinzipien verwendet werden. Ausgehend von Abb. 4.1 gibt es sechs Funktionsträger für die Funktion "Zuteilen". Durch Kombination eines Symbols für das Werkstückverhalten und eines

Symbols für den erforderlichen Funktionsträger lässt sich eine Funktionsfolge deutlich darstellen. **Abb. 4.2** zeigt ein Beispiel zur symbolischen Darstellung der Funktion "Zuteilen". Aus sechs Varianten lässt sich eine geeignete Lösung für die spezifizierte Handhabungsaufgabe auswählen.

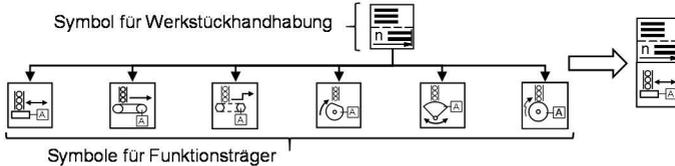


Abb. 4.2: Eine Kombinationsmöglichkeit zur Realisierung einer Handhabungsfunktion

Ein weiteres Beispiel zeigt einen Handhabungsablauf von Zylinderstiften. Die Zylinderstifte werden in einem Magazin geführt und gespeichert. Aus diesem Speicher müssen einzelne Stifte abgeteilt und in eine Übergabeposition gebracht werden. Der Handhabungsablauf wird durch die Funktionsfolge in **Abb. 4.3** formuliert.

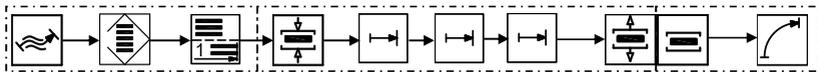


Abb. 4.3: Beispielhafte Funktionsfolge für eine Zylinderstiftzuführung

Eine Lösung für ein Montagesystem kann beispielweise durch die Verknüpfung von ausgewählten Funktionsträger mittels morphologischen Kastens entwickelt werden. Hier werden die Funktionen gemäß der Funktionsfolge von oben nach unten in Spalten angeordnet. Gemäß der Funktion werden die zugehörigen Funktionsträger zeilenweise eingefügt. Für das Beispiel aus **Abb. 4.3** wird ein morphologischer Kasten gemäß **Abb. 4.4** entwickelt.

Basierend auf den unterschiedlichen Lösungen werden Funktionsfolgen mit den Kombinationssymbolen aufgebaut. Als Beispiel hierzu zeigt **Abb. 4.5** die Funktionsfolge zur Zylinderstiftzuführung mit der Lösung 1. Die Zylinderstifte werden durch Schwerkraft zum Magazin geführt und bewegen sich im Magazin zur Halteposition ebenso durch Schwerkraft. Ein Zylinderstift wird durch den Zuteiler gehalten und zur Spannposition verschoben. Dann wird er

durch einen 2-Backengreifer gespannt und zur Übergabeposition durch eine Pick & Place Einheit transportiert.

Symbol	Variante Funktion	1	2	3	4	5	6
			Führen				
	geordnetes Speichern						
	Zuteilen						
	Spannen						
	Pick & Place						
	Entspannen						
	Halten						
	Schwenken						

↓
↓
↓

Lösung 1 Lösung 2

Abb. 4.4: Morphologischer Kasten mit Variantenbildung

Ein weiteres Beispiel für Anwendung von Funktionsfolge zur Formulierung der Handhabungsaufgaben sowie den Einsatz von Symbolen für die Funktionssträger wird **Anhang 9.2** gezeigt. Hierbei behandelt es sich um eine Lösung für die automatisierte Montage eines Kegelradgetriebes.

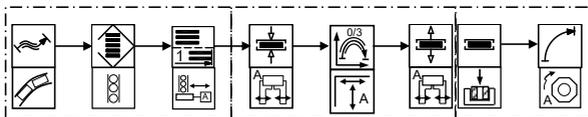


Abb. 4.5: Funktionsfolge mit symbolischen Darstellung für Werkzeuge (vgl. Abb. 4.3)

4.2 Entwicklung neuer parametrische Symbole

4.2.1 Funktionalitäten und Anforderungen der neuen Symbole

Für die Entwicklung und Umsetzung des integrativen Montageplanungssystems auf Basis von Funktionsfolgen spielt der zielgerichtete Aufbau einer flexibel erweiterbaren Symbolsprache eine entscheidende Rolle. Insbesondere sind Kommunikationsschnittstellen der neuen Symbolbausteine vorzusehen, die eine parametrische und intelligente Verknüpfung der einzelnen Funktionen erlauben [Ngu15b]. Ein Symbolbaustein, wie in **Abb. 4.6** gezeigt, verfügt demnach über einen direkt verknüpften Funktionsträger mit hinterlegten Funktionsträgervarianten, die über eine ausgelagerte Anforderungsliste für die zu suchenden Funktionsträger vorgefiltert wird.

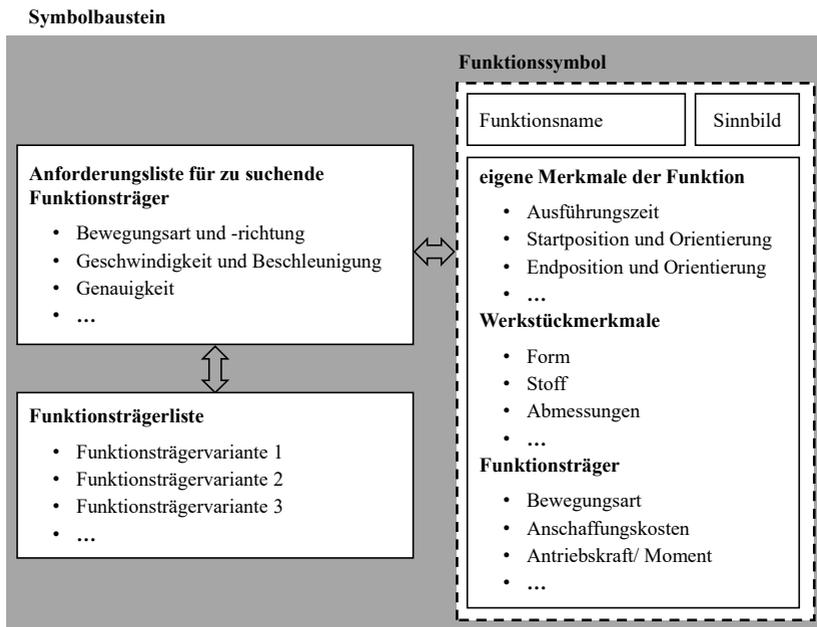


Abb. 4.6: Aufbau eines Symbolbausteins

Diese ausgelagerten Anforderungslisten sind als funktionsorientierte Erweiterung der übergeordneten Funktionsträger des Gesamtsystems zu betrachten. Mit dieser Erweiterung stellt die sinnfällige Verknüpfung zu den Funktionsfolgen einen direkten Erkenntnisgewinn für deren praktische Umsetzung dar. Dazu müssen für jede Handhabungsfunktion neue parametrische Symbole mit deren spezifischen, wesentlichen Parametern entwickelt werden. Um diese Aufgabe auszuführen, wurde mit dem Symbolbaustein ein Entwicklungstool zur eigenen Umsetzung der Funktionen geschaffen.

Die neuen Symbolbausteine sind nach analoger Vorgehensweise in einer Funktionsfolge derart zu kombinieren, dass alle Montage- und Handhabungsvorgänge für die zu bearbeitenden Werkstücke entsprechend Montagereihenfolge abgebildet werden. Aus dieser Funktionsfolge wird mit Hilfe der automatisierten Vorauswahl über die Anforderungsliste für die zu suchenden Funktionsträger ein plausibles Spektrum an Varianten herausgefiltert und für die Auswahl als Funktionsträgerliste (FTL) zur Verfügung gestellt. Hierfür müssen die neuen Symbolbausteine mit den funktionsinhärenten Merkmalen, den Werkstückmerkmalen und den Parametern der Funktionsträger bestückt sein.

4.2.2 Parameteridentifikationen

Jede Handhabungsfunktion beschreibt eine eigene Aufgabe, wodurch sie unterschiedliche Parameter erfordert. In der Funktionsfolge ist das Funktionssymbol das wichtigste Kettenglied. Um die Funktionsfolge richtig zu erstellen, wird ein neues parametrisches Symbol mit Eingangs- und Ausgangsparameter definiert. Die Handhabungsfunktion enthält die Eingangsparameter, bearbeitet diese und gibt die Ausgangsparameter aus (s. **Abb. 4.7**).

Eine Handhabungsfunktion kann mit Hilfe der genannten Eingangs- und Ausgangsgrößen eindeutig definiert werden. Die Veränderung von Energie wird im Bereich des Handhabens nicht betrachtet. Um die wesentlichen Parameter für einzelne Symbole zu definieren, werden die Definitionen sowie die Realisierungen deren Funktionen beachtet. Die wesentlichen Parameter eines neuen Symbols umfassen:

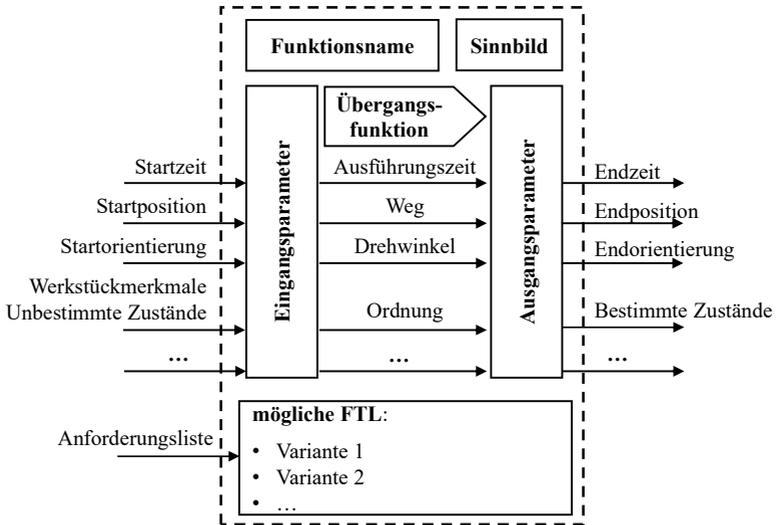


Abb. 4.7: Eingangs- und Ausgangsparameter des neuen Funktionssymbols

1. **Zeit:** Eine Funktionsfolge beschreibt einen Montage- und Handhabungsprozess zeitlich nacheinander oder parallel. Jede Aktion, wie z. B. Verschieben, Greifen usw., besitzt eine Ausführungszeit und wird durch Start- und Endzeit bzw. Dauer beschrieben. Die vorgegebene Zeit ist nur eine Schätzzeit und hängt von dem ausgewählten Funktionsträger ab.
2. **Werkstückmerkmale bzw. Produktmerkmale:** Beim Fügen werden die Einzelteile oder Baugruppen zusammengestellt, d.h. die Werkstückmerkmale zwischen Eingang und Ausgang des Fügens werden verändert.
3. **Eigene Merkmale der Handhabungsfunktion:** Um einen besseren Überblick über die Eingangs- und Ausgangsparameter der Funktionen zu haben, wird das Handhaben in fünf Gruppen mit spezifischen Eingangs- und Ausgangsparametern unterteilt (s. **Tabelle 4.1**).

4. Funktionsträger / Anschaffungskosten: Zur Auswahl eines Funktionsträgers werden die Informationen zur Erstellung der Anforderungslisten, wie Hub, Drehwinkel, Geschwindigkeit, Schiebkraft, Drehmoment, Wiederholgenauigkeit, Leistung, Nutzungsdauer usw., benötigt. Ausgehend vom Wirkprinzip der Handhabungsfunktion, vorgegebenen Parametern im Symbol und weiteren Anforderungen werden die FTL gesucht. Die Anschaffungskosten sind dabei nur ein Faktor in der Anforderungsliste zur Auswahl einer Variante.

Tabelle 4.1: Allgemeine Parameter für Funktionen

	Eingangsparameter	Ausgangsparameter
Gruppe "Speichern"	Werkstückmerkmale, Anzahl oder Volumen	Abmessungen von Speichern; Ordnungszustand, Positionen und Orientierungen von Werkstücken
Gruppe "Mengenverändern"	Ordnungszustände, Positionen und Orientierungen von Werkstücken, Werkstückmerkmale	Mengenströme bzw. Anzahl von Werkstücken, Positionen und Orientierungen sowie Merkmalsklassen von Werkstücken
Gruppe "Bewegen"	Positionen und Orientierungen von Werkstücken	Positionen, Orientierungen und Ordnungszustand von Werkstücken
Gruppe "Sichern"	Greifposition bzw. Haltposition, Werkstückmerkmale	Formschluss, Greifkraft
Gruppe "Kontrollieren"	Prüf- und/oder Messeigenschaften; Toleranz	Prüf- und/oder Messergebnisse

Zur Ermittlung der Position und Orientierung des Werkstücks werden ein Bezugskoordinatensystem und ein körpereigenes Koordinatensystem definiert (s. Kapitel 4.3.1). **Abb. 4.8** zeigt ein Beispiel zum Ermittlung der Eingangs- und Ausgangsparameter der Funktion "Zuteilen". Die Funktion "Zuteilen" teilt eine Anzahl n des Körpers 1 aus der Position 1 in der Startzeit t_1 und bringt diese in der Position 2 im Beziehung zum Bezugskoordinatensystem xyz , in der Endzeit t_2 . Die Positionen 1 und 2 werden durch die Positionsvektoren $\vec{p}_1^{(1)} = [x_1^{(1)}, y_1^{(1)}, z_1^{(1)}]^T$ mit dem KKS $(u_1^{(1)}, v_1^{(1)}, w_1^{(1)})$ und $\vec{p}_2^{(1)} = [x_2^{(1)}, y_2^{(1)}, z_2^{(1)}]^T$ mit dem KKS $(u_2^{(1)}, v_2^{(1)}, w_2^{(1)})$ beschrieben. Während des Zuteilens wird die Position der Werkstücke mit der Zeit verändert und durch die Übergangsfunktion $f(x, y, z, n, t)$ definiert.

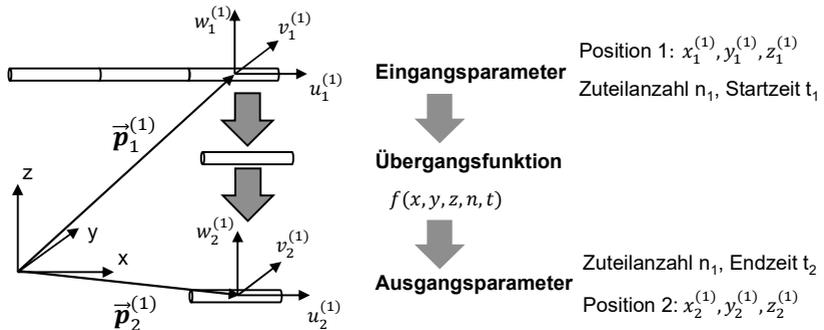


Abb. 4.8: Parameteridentifikation am Beispiel für Funktion "Zuteilen"

4.2.3 Aufbau und Umsetzung der Symbolsprache

Die Verknüpfung von einem ersten parametrischen Symbol mit einem darauffolgenden parametrischen Symbol in einer Funktionsfolge wird als Funktionsschnittstelle bezeichnet. Mit den Funktionsschnittstellen wird neben der reinen Verknüpfung eine Interaktion der einzelnen Funktionen untereinander ermöglicht. Zwei zu verknüpfende Symbole bzw. Funktionen sind im Vorfeld auf ihre Verträglichkeit und Kombinierbarkeit zu überprüfen, denn die

Ausgangsparameter einer Funktion bilden die Eingangsparameter der folgenden Funktion. (s. **Abb. 4.9**). Diese Kontrolle erfolgt in der Regel über einen Abgleich der genannten Parameter.

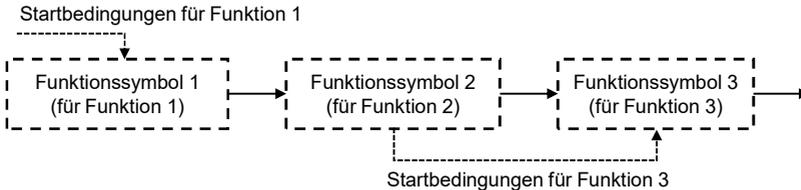


Abb. 4.9: Schnittstelle einer Funktionsfolge

Ein weiteres wesentliches Aufbaumerkmal der neuen parametrischen Symbole ist deren Verwendbarkeit für verschiedene Funktionsfolgen und die Möglichkeit der flexiblen Gestaltung, Erweiterung und Veränderung im Rahmen der logischen Verknüpfbarkeit. Diese Verknüpfbarkeit wird im Wesentlichen durch die Eingangs- und Ausgangsparameter einer Funktion festgelegt. Neben den rein technischen Parametern der physikalischen Wirkzusammenhänge sind unter anderem auch Startbedingungen integriert. Zur Schnittstellendefinition werden folgende Punkte beachtet:

- **Position und Orientierung des Montageobjekts:** Während des Handhabungsprozesses bewegt sich das Montageobjekt durch die verschiedenen Lagen. Der Entwurf des Positions- und Orientierungswechsels beschreibt die Werkstücklage in verschiedenen Schritten des Handhabungsverfahrens und unterstützt bei der technischen Lösungsfindung.
- **Wirkprinzip des Funktionsträgers:** Die Funktionsfolge mit parametrischen Funktionssymbolen formuliert nicht nur die Montageaufgabe sondern auch die ableitbaren technischen Lösungen. Das Wirkprinzip des Funktionsträgers beeinflusst die Bewegung der Werkstücke sowie deren funktionale Kombinationen und muss entsprechend der Montageaufgabe ausgewählt.

- **Zeitdauer einer Funktion:** Die Zeitdauer einer Funktion ist abhängig von den Funktionsträgern. Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen werden für Werkstücke und Funktionsträger ermittelt. Ausgehend von der Zeitdauer wird die Gesamtausführungszeit bzw. Taktzeit einer Funktionsfolge ermittelt, ggf. geschätzt.
- **Startbedingungen:** Ein Funktionssymbol wird logisch mit einem anderen Funktionssymbol verknüpft. Die Startbedingungen definieren die Restriktionen zur Start der Funktion bzw. Funktionsträgers. Diese Bedingungen können die bestimmten Zustände von Werkstücken, Prüf- oder Messergebnisse der Gruppe "Kontrollieren" oder ankommendes Signale von anderen Funktionsträgern sein.

Ein allgemeines parametrisches Symbol umfasst den Funktionsnamen, das Symbol, die Eingang- und Ausgangsparameter sowie die Variante. Zur Verdeutlichung des Aufbaus wird als Beispiel die Funktion "Zuteilen" beschrieben. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um die Funktion "Zuteilen" zu realisieren. Die Werkstücke könnten z. B. durch einen Greifer mit einem Roboter aus einem Magazin oder Bunker zum Zielort gebracht werden.

Funktionsname	Zuteilen		← Symbol	
Startbedingungen	Bedingungen: Werkstückabfrage mit Lichtsensor		} Werkstückparameter	
Startzeit	t_Start(s):	0		
Zeitdauer	t_Dauer(s):	0,375		
Zuteilanzahl	n (Stk):	1		
Startposition	(S) Px; Py; Pz (mm):	650; 50; 0		
Endposition	(E) Px; Py; Pz (mm):	650; -100; 0		
Drehwinkel	Rotation (°):			
Positionsabweichungen	$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):	1096		
Funktionsträgervariante	Variante:	CLM 100-H150		} Werkzeugparameter
Anschaffungskosten	Kosten (€):	1096		

Abb. 4.10: parametrisches Symbol "Zuteilen"

Ausgehend von den Parametern in Tabelle 4.1 und Abb. 4.8 werden die Eingangs- und Ausgangsparameter bestimmt. Um die FTL für das Zuteilen zu ermitteln, werden die Start- und Endzeit sowie die Lage des Werkstücks benötigt [Ber17]. Nach der Festlegung der Eingangs- und Ausgangsparameter wird ein parametrisches Symbol für die Funktion "Zuteilen" erstellt. Alle Parameter an der linken Seite des Symbols sind die erforderlichen Informationen. Die einzugebenden Parameter stehen an der rechten Seite des Symbols (s. **Abb. 4.10**). Die Liste der wesentlichen parametrischen Symbole wird in **Anhang 9.1.3** beschrieben.

4.3 Implementierung der Parameter

4.3.1 Position und Orientierung eines Körpers im Raum

In den Handhabungsabläufen bewegt sich ein Körper aus einer bestimmten in eine andere bestimmte Position und Orientierung. Zur Veränderung der Position und Orientierung werden die Funktionen in der Gruppe "Mengen verändern" und "Bewegen" verwendet. Das definierte Verändern einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von Körper ist die wichtigste Aufgabe des Handhabens. Um die Position und Orientierung eines starren Körpers in Bezug auf das globale, feste Koordinatensystem darzustellen, wird der Körper mit einem lokalen beweglichen Koordinatensystem definiert. Volmer [Vol92] verwendet für das körpereigene Koordinatensystem die Bezeichnung (u, v, w) und für das Bezugskordinatensystem (x, y, z) :

- Das körpereigene Koordinatensystem (KKS) beschreibt den zu handhabenden Körper fest und wird mit diesem Körper mitbewegt.
- Das Bezugskordinatensystem (BKS) beschreibt das Initialsystem. Entsprechend der Montageanlage werden Koordinatenursprung und Richtungen der Achsen des BKS definiert.

Ein lokales Koordinatensystem ist nur für den geometrischen bestimmten Körper eindeutig. Die Festlegung eines körpereigenen Koordinatensystems

muss entsprechend der Körpergeometrie und bezogen auf die Aufgabestellung erfolgen. Zur Bestimmung eines körpereigenen Koordinatensystems nach [Loy10] werden die Bauteile in zwei Gruppen (Rotationsteile und Nichtrotationsteile) unterteilt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Schwerpunkt des Körpers. Die u -Achse wird der Rotationsachse oder der längsten Dimension des Bauteils zugewiesen. Die v -Achse wird dem Radius oder der zweitlängsten Dimension zugewiesen. Die w -Achse wird durch die rechte Handregel bestimmt (s. **Abb. 4.11**).

Die allgemeine Bewegung des Körpers aus einer Lage in eine andere Lage ist aus Translation und Rotation zusammengesetzt. Die Position und Orientierung eines Körpers im Raum ist durch sechs Koordinaten definiert: drei Translationskoordinaten und drei Rotationskoordinaten

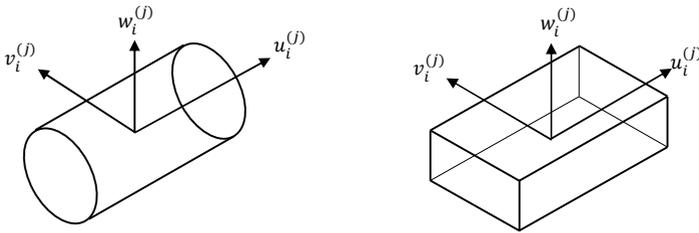


Abb. 4.11: Festlegung des körpereigenen Koordinatensystems

wobei: i — Position des Objekts; j — Objekt j ;

$i, j \in \mathbb{N}_+$ — Menge der positiven natürlichen Zahlen

Bei Translation wird der Ursprung des körpereigenen Koordinatensystems (KKS) gegenüber dem Ursprung des Bezugskordinatensystems (BKS) verschoben. Bei Rotation wird der Ursprung des KKS gegenüber dem Ursprung des BKS rotiert. Die Position des Körpers im Raum kann durch den Ursprung des KKS in Bezug im dem BKS definiert und durch einen Vektor \vec{p} beschrieben werden (s. **Abb. 4.12**).

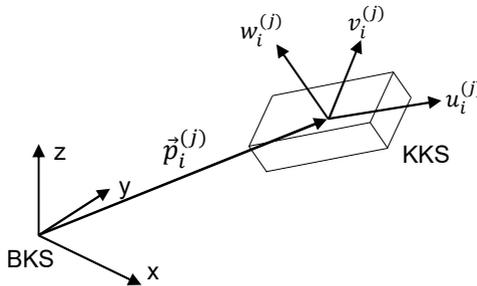


Abb. 4.12: Bezugskoordinatensystem und körpereigenes Koordinatensystem

Im Allgemeinen kann die Position i eines Körpers j in Bezug auf das BKS durch einen Spaltenvektor beschrieben werden.

$$\vec{p}_i^{(j)} = [x_i^{(j)}, y_i^{(j)}, z_i^{(j)}]^T \quad (4.1)$$

Die Orientierung des Körpers kann durch die Winkelbeziehung zwischen den Paaren der entsprechenden Achsen von KKS und BKS definiert werden. Trotzdem hat diese Beschreibung wenig praktischen Wert, da sie keine klare Visualisierung der räumlichen Anordnung ermöglicht [Len13].

Um die Orientierung des Körpers zu beschreiben, wird der Ursprung des KKS mit dem Ursprung des BKS zusammengelegt. Die Drehungen des Körpers sind nicht kommutativ und deren Ergebnis ist eine Reihenfolge der Rotationen [Zwi09]. Zur Beschreibung einer Rotation können Rotationsmatrizen, Eulerwinkel bzw. Rotationswinkeln, Drehachsen und Drehwinkel usw. verwendet werden. Jede beliebige Orientierung des Körpers in Bezug auf das BKS kann durch drei aufeinander folgende Drehungen durchgeführt werden. Im Bereich der Handhabungstechnik können Werkstücke um die Achsen des KKS (s. **Abb. 4.13**) oder eine beliebige Achse rotiert werden.

Euler-Winkel und Rotationsmatrizen sind zwei Verfahren zur Beschreibung der Orientierung und werden am häufigsten angewandt. Mit dem Euler-The-

orem lässt sich eine beliebige Rotation eines Körpers als Folge von drei Rotationen um drei ausgewählte Achsen seiner Körperachsen durchführen. Hiermit sind zwei aufeinanderfolgende Körperachsen unterschiedlich. Die Richtung der Rotation wird prinzipiell als mathematisch positiv angenommen. Die Koordinatensysteme für die drei aufeinander folgenden Drehungen werden als uvw (erste Rotation), $u'v'w'$ (zweite Rotation) und $u''v''w''$ (dritte Rotation) bezeichnet.

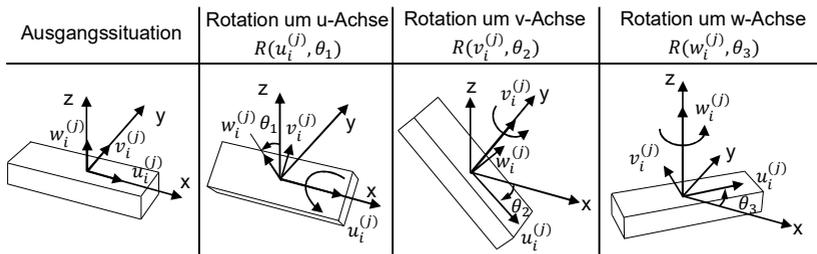


Abb. 4.13: Rotation um die x-, y- und z-Achse [Lin16]

Zum Beispiel wird für die Rotationen um die w , u' und w'' -Drehachsen zuerst der Körper um die w -Achse (Kurzzeichen w) des BKS mit dem Winkel α gedreht. Dann wird er um die u -Achse (Kurzzeichen u') mit dem Winkel β und danach um die w -Achse (Kurzzeichen w'') mit dem Winkel γ gedreht. Die Beschreibung der $wu'w''$ -Drehung wird im parametrischen Symbol hinterlegt.

$$R(wu'w'', \alpha, \beta, \gamma) = R(w_i^{(j)}, \alpha) \cdot R(u_i^{(j)}, \beta) \cdot R(w_i^{(j)}, \gamma) \quad (4.2)$$

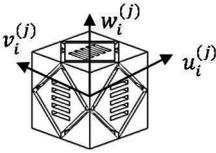
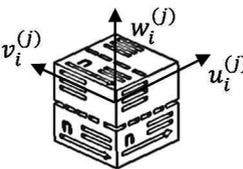
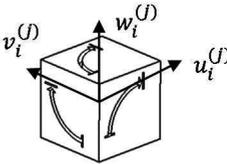
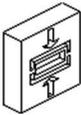
4.3.2 Gestaltung der 3D-Symbolen

Um die Anordnung bei der Layoutplanung zu ermitteln, ist der Materialfluss zu analysieren. Beim Betrachten der einzelnen Montage- und Handhabungsfunktionen, wie Position und Orientierung von Werkstücken, Bewegungsbahn, Puffer- und Zwischenlagerflächen usw., wird der Werkstückfluss entworfen. Die aktuellen Entwicklungen nutzen zunehmend Software-Tools, um die 2D oder 3D-CAD-Anordnung zu beschreiben. Das 3D-Anlagenmodell

dient nicht nur dem virtuellen Abbild der Anlage, sondern auch der Durchführung von Kollisionsprüfungen zwischen Anlagen [Web16].

Im Hinblick auf die Darstellung von der räumlichen Anordnung bzw. Ortswechselplan wurden ebenso 3D-Symbole gestaltet (s. **Tabelle 4.2**). Somit können 3D-Symbole für die Funktionsfolge im räumlichen kartesischen Koordinatensystem eingesetzt werden [Ngu15a].

Tabelle 4.2: Einordnung der 3D-Symbole

<p>a)</p>	 <p>Symbol "geordnetes Speichern" in der Gruppe "Speichern"</p>	 <p>Symbol "Zuteilen" in der Gruppe "Mengen verändern"</p>	 <p>Symbol "Schwenken" in der Gruppe "Bewegen"</p>
<p>b)</p>	 <p>Symbol "Greifen" in der Gruppe "Sichern"</p>	 <p>Symbol "Anwesenheit prüfen" in der Gruppe "Kontrollieren"</p>	

3D-Symbole werden in zwei Hauptgruppen gegliedert:

- Die Gruppen "Menge verändern" und "Bewegen" verändern eine Position und Orientierung eines Werkstücks oder einer Menge von Werkstücken. Für diese Gruppen müssen Startlagen und Zielorte vorgegeben werden. Die Gruppe "Speichern" definiert die Positionen und Orientierungen von Werkstücken. Somit werden die 3D-

Symbole der Gruppen "Menge verändern", "Bewegen" und "Speichern" als Würfel gezeichnet (s. **Tabelle 4.2, a**).

- Die Gruppen "Sichern" und "Kontrollieren" verändern die Lagen von Werkstücken nicht. Daher werden die 3D-Symbole der Gruppen "Sichern", "Kontrollieren" als die Quader gezeichnet (s. **Tabelle 4.2, b**).

Diese 3D-Symbole können nicht nur die Lage eines Körpers beschreiben, sondern auch wie der Körper eine vorgegebene Lage mit welchen Funktionen erreichen. In **Abb. 4.14** wird der Körper aus der Lage 1 in die Lage 2 durch die Funktion "Zuteilen" verschoben und aus der Lage 2 in die Lage 3 durch die Funktion "Schwenken" rotiert. Das Schwenken aus der Lage 2 in der Lage 3 wird durch den Vektor $\vec{p}_3^{(1)} = [x_3^{(1)}, y_3^{(1)}, z_3^{(1)}]^T$ und Drehwinkel $R(w_3^{(1)}, \gamma)$ dargestellt. Für die Bewegung eines Körpers aus einer Start- in eine Endlage gibt es unterschiedliche Bewegungsbahnen. Die Bewegungsbahn wird durch die Positionen und die Orientierungen des KKS definiert. Zur Beschreibung der Bewegungsbahn können die 3D-Symbole mehrfach nacheinander genutzt werden.

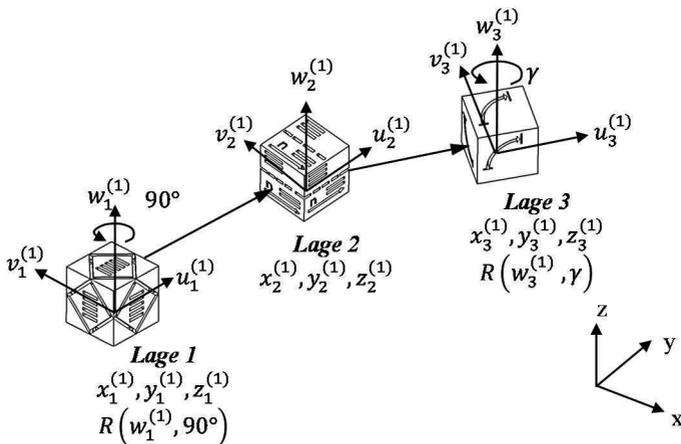


Abb. 4.14: Darstellung der Bewegungen eines Körpers im Raum durch 3D-Symbole

4.4 Rechnergestützte Umsetzung der Symbolsprache

4.4.1 Parametrische Symbole

Um eine Funktionsfolge zu erstellen, müssen eindeutige Symboldarstellungen definiert sowie geordnet und verbunden werden. Anschließend werden den Symbolen die entsprechenden Informationen hinzugefügt. Durch Verwendung eines Visualisierungsprogramms wird eine Funktionsfolge schnell und effektiv erstellt [yEd17], [Edr17]. Heutzutage existieren unterschiedliche Visualisierungsprogramme, wie yEd Graph Editor, Edraw Max, usw., auf dem Markt [Lis17]. Diese Tools liefern bereits vordefinierte Form- und Symbolbibliotheken, wodurch einfache oder komplizierte Ablaufdiagramme per "Drag and Drop" schnell erstellt werden. Allerdings ermöglichen diese Programme dem Benutzer nicht die Definition eigener Symbole.

Microsoft Visio ist ein windowsbasiertes Computerprogramm und erlaubt die Erstellung eigener, benutzerdefinierter Formen und das Hinzufügen dieser zu einer Bibliothek. Diese gespeicherten Bibliotheken dienen dem Aufbau eigener Funktionsfolgen. Mit Microsoft Visio lässt sich ebenso eine Benutzeroberfläche entwerfen [Mar12]. Das gesamte Vorgehen benötigt jedoch sehr viel Zeit, um neue Symbole zu erstellen und um die Parameter einzugeben. Um die parametrischen Symbole zu erstellen, können die Informationen alternativ in einer externen Datenbank hinterlegt und mit Visio verknüpft werden. Somit werden die Symbole schneller geschaffen. Schritte zum Aufbau der parametrischen Symbole werden in **Abb. 4.15** beschrieben.

Im *Schritt 1* werden alle Informationen aus einer externen Datenquelle in die parametrischen Symbole importiert. Diese Informationen aller Funktionen wurden in getrennten Arbeitsblätter bei einer Excel-Arbeitsmappe eingegeben und gespeichert. Entsprechend einem erstellten Symbol wird ein Arbeitsblatt ausgewählt. Im *Schritt 2* kann man die vorgegebenen Parameter auswählen, die im Symbol angezeigt werden. Um die zugehörigen Beschriftungen zu zeigen sowie die Platzhalter für die Parameter zu erzeugen, wird der

entsprechende Text im *Schritt 3* ausgewählt. Nach der Schaffung eines Symbols wird das Symbol in der Bibliothek als Vorlage gespeichert. Damit kann die Bibliothek für den Aufbau einer Funktionsfolge verwendet werden.

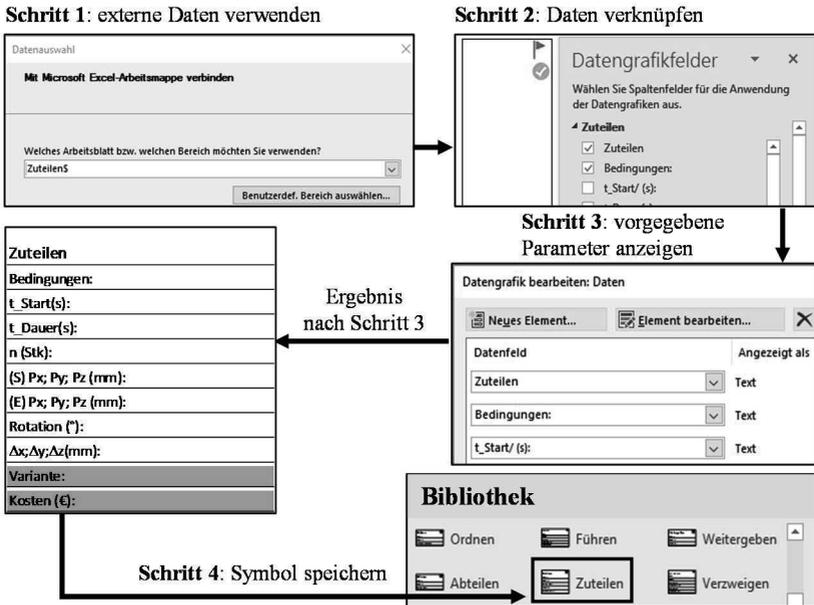


Abb. 4.15: Schritte zur Erstellung eines parametrischen Symbols und Bibliothek

Mit Visio lassen sich die Handhabungssymbole erzeugen und als eine Bibliothek speichern. Aus der gespeicherten Bibliothek werden die parametrischen Symbole für eine Funktionsfolge verwendet. Per "Drag and Drop" wird ein Symbol auf das Zeichenblatt gezogen (s. **Abb. 4.16**).

Für ähnliche wiederkehrende Anlagenplanungen und umfassend erstellte Symboldatensätze ergibt sich mittels geschickter Implementierung die Möglichkeit, eine Lösung hinsichtlich unterschiedlicher Zielparameter auszurichten. Gegenwärtig ist dies in klein- und mittelständischen Unternehmen noch ein Prozess, der vorwiegend auf einem begrenzten Zulieferstamm und damit

verbundenen Kenndaten basiert und sich mit den oftmals langjährigen Erfahrungen der Verantwortlichen paart.

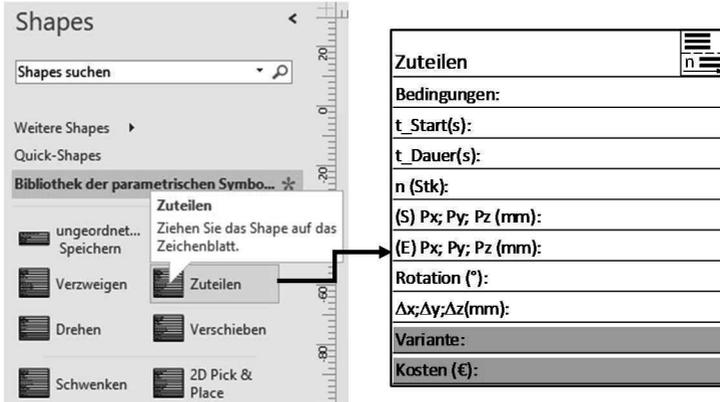


Abb. 4.16: Symbolischen Bibliothek zur Erstellung einer Funktionsfolge

Diesbezüglich gestaltet sich die Suche nach dem in jeder Hinsicht optimalen Anlagenlayout, unter Beachtung der Vielzahl von Anbietern und den sich mehr und mehr differenzierenden Produkten im Umfeld der Montage- und Handhabungstechnik, als zunehmend komplex und schwierig. Für die detaillierte Beschreibung der ausgewählten Variante kann die Abbildung des Funktionsträgers mit dem Symbol verlinkt werden. Neben der Variante wird die Abbildungen für jede Variante erstellt (s. **Abb. 4.17**). Somit lässt sich die Gestaltung sowie Abmessungen der Variante anzeigen.

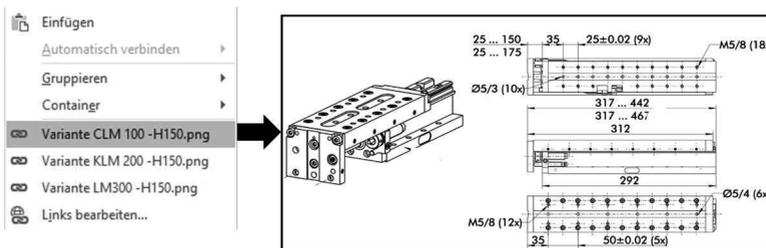


Abb. 4.17: Verknüpfung der Variante mit Ausführungsvariante (Bild [Sch17])

4.4.2 Ortswechselplan

Microsoft Visio und andere Softwareprodukte, wie beispielweise EdrawSoft oder LanFlow, bieten unter anderem die Möglichkeit, dreidimensionale Formen in einer virtuellen Umgebung koordinatenbasiert zu integrieren. Die Lagen der Formen werden bei diesen Lösungen jedoch nur in der XY Ebene beschrieben. Die Darstellung der Position und Orientierung von Werkstücken im Raum ist somit nicht möglich. Mit anderen 3D-CAD Programme, wie PTC Creo, Solidworks usw., lässt sich eine räumliche Platzierung und Ausrichtung von 3D-Objekten schnell und effizient umsetzen. Allerdings können die Lagen der Objekte im Hinblick auf Bezugskoordinatensystem nicht ohne weiteres beschrieben werden.

Entwurf der Werkstücklagen im Raum

Nach der Erstellung der Funktionsfolge mit den zugehörigen Handhabungssymbolen werden die Verfahrenwege bzw. Lagen der Werkstücke benötigt. Die eingegebenen Lagen werden analysiert und als Merkmale an den Funktionsträger übergeben. In diesem Fall werden die Lagen der Werkstücke in Bezug zum BKS beschrieben. Ausgehend von den Lagen der Werkstücke werden anschließend die geeigneten Anlagenkomponenten ausgewählt.

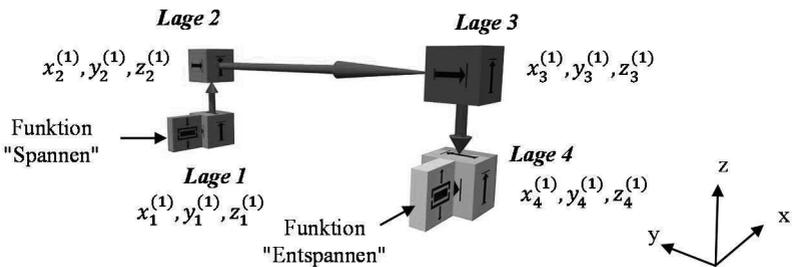


Abb. 4.18: Beispiel einer Funktionsfolge mit 3D-Symbolen

Abb. 4.18 zeigt ein Beispiel einer Funktionsfolge mit 3D-Symbolen für eine Pick & Place Bewegung. Die Bewegungsrichtung sowie die Position des

Werkstücks in der Start-, Zwischen- und Endposition werden durch 3D-Symbole "Verschieben" dargestellt. Die Symbole "Spannen" und "Entspannen" stehen neben der Start- und Endposition.

Funktionsfolge mit 3D-Symbole bzw. Ortswechselplan

Die Funktionsfolge in Abb. 4.18 ist übersichtlich und leicht verständlich. Jedoch können die Lagen der Werkstücke auch für größere Formulierungsaufgaben, wie ein komplettes Montagesystem, dargestellt werden.

Abb. 4.19 zeigt ein Beispiel zum Aufbau einer Funktionsfolge mit Anwendungssoftware "3D Builder". Zum Ziehen oder Drehen eines Objektes kann man in das Objekt anklicken und anschließend die Verschiebungsrichtung bzw. Drehrichtung auswählen. Die Position und Orientierung des Objektes relativ zum Bezugskoordinatensystem erscheinen im Dateneingabefenster.

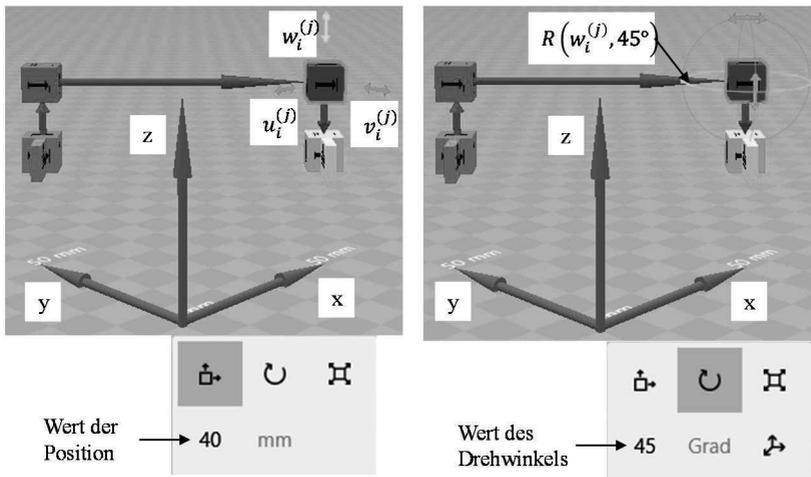


Abb. 4.19: Erstellung eines Ortswechselplans durch Computersoftware "3D-Builder"

5 Umsetzung des neuen Montageplanungssystems

5.1 Grobplanung eines Montagesystems

5.1.1 Ermittlung von Funktionen

In der Grobplanung werden die Handhabungsfunktionen für eine Montage- und Handhabungsaufgabe, basierend auf dem Montageprodukt sowie dessen Merkmalen, und die Montagereihenfolge bestimmt. Mit Hilfe der entworfenen Symbole für die Funktionsträger zur Abbildung der Grundaufgaben werden die Montage- und Handhabungsaufgaben so exakt wie möglich deklariert.

In einer exemplarischen Montage in Form einer starren Verkettung soll eine Baugruppe z. B. mit Hilfe eines Werkstückträgers durch die Anlagen geführt und dabei montiert werden. Während der Anlagenplanung werden den Funktionen Montage- und Handhabungszeiten hinzugefügt, z. B. dem Basisteil eine sogenannte Führungszeit $t_{\text{Führen}}^i$, den Einzelteilen die jeweilige spezifische Handhabungszeit t_{jk}^i und darüber hinaus die Zeit für den zu gestaltenden Primärvorgang, z. B. eine Fügezeit t_{Fj}^i . Zur stationsbezogenen Bewertung werden die Handhabungszeiten der Einzelteile zusammengerechnet, wie in **Abb. 5.1** für neun Einzelteile in drei Stationen gezeigt.

Die vorgegebene Zeit im parametrischen Symbol ist nur eine vorschlagende Zeit, um sich bei der Auswahl eines Funktionsträgers zu orientieren. Eine Montageanlage besteht aus normalerweise drei Baueinheiten:

- Grundeinheiten: Gestell, Platten, Konsole
- Haupteinheiten: Bewegungsmodule und Arbeitsorgane, wie z. B. Dreh- und Lineareinheiten, Greifer, Fügemechanismen, Wechselsysteme usw.
- Hilfs- und Zusatzeinheiten: Steuerung, Kontrolle, Entsorgung, Überwachung usw.

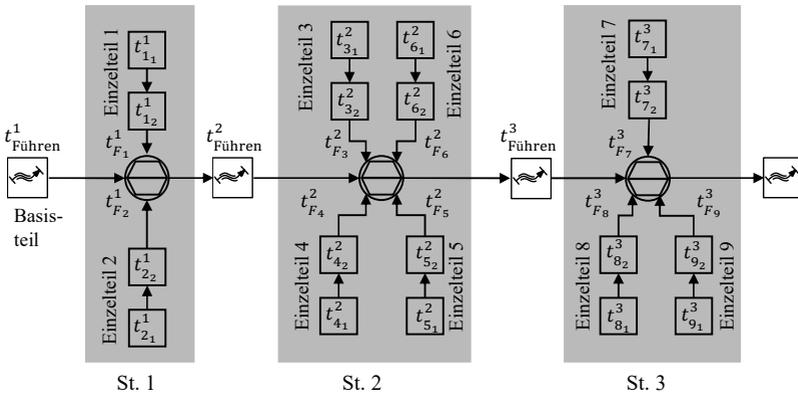


Abb. 5.1: Anordnung der Montagestationen in Bezug auf die Funktionsfolge

In dieser Arbeit werden die Rollen der Signal-, Steuer-, Stell- und Antriebsglieder nicht behandelt, sondern nur Arbeitsglieder bzw. Funktionsträger betrachtet. Allerdings sind diese Glieder unbedingt notwendig für eine mechanische Maschinensteuerung. Die Ausführungszeiten der Signal-, Steuer- und Stellglieder, wie z. B. Ansprechzeit eines Sensors, Umschaltzeit eines Ventils, usw., sind relativ kurz. Deshalb kann man diese Zeiten ignorieren.

Die Grobplanung dient nur der Bestimmung von Funktionen und deren Funktionsträger. In dieser Phase können die Verfahrenzeiten der Funktionsträger nur grob abgeschätzt werden. **Abb. 5.2** zeigt eine Funktionsfolge mit den Symbolen für Werkstück und Funktionsträger.

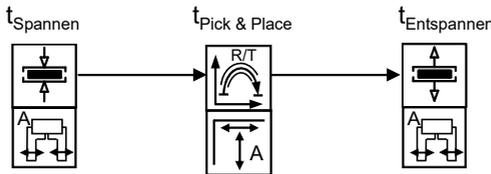


Abb. 5.2: Beispielhafte Funktionsfolge mit den Ausführungszeiten

Die im Bild dargestellte Funktionsfolge beschreibt einen häufigen vorkommenden Pick & Place Ablauf unter Verwendung der Funktionen "Spannen", "2D Pick & Place" (ehem. Verschieben) und „Entspannen“. Diese Funktionsfolge verwendet einen 2-Backen-Parallelgreifer und zwei kombinierte Linearmodule zum Verschieben. Zur groben Abschätzung der Verfahrzeiten dienen Informationen aus Produktkatalogen oder durch mathematische Gleichungen berechnete Werte.

- Sind die Verfahrzeiten der Haupteinheiten im Produktkatalog enthalten, werden die passenden Verfahrzeiten entsprechend der Varianten eines Funktionsträgers ausgewählt. Z. B. sind für Backengreifer die technischen Parameter sowie Schließ- und Öffnungszeiten meist angegeben. Für Linear- bzw. Schwenkeinheiten hängen die Verfahrzeiten von dem Anwendungsfall, wie Weg, Nutzlast, Antriebsarten usw., ab.
- Wenn die Verfahrzeiten nicht dokumentiert sind, müssen diese grob berechnet werden. Dies geschieht in Abhängigkeit vom Antriebssystem, den damit verbundenen zulässigen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie anderen Faktoren, wie Massen, Fahrweg, Positionierung. **Anhang 9.4** zeigt entsprechende Berechnungsbeispiele für von Dreh- und Lineareinheiten.

5.1.2 Aufteilung der Arbeitsinhalte

Allgemein finden die meisten Handhabungsoperationen im Bereich der Montage statt, da hier viele Bauteile und Werkzeuge im Einsatz sind. Jedoch zählt das Handhaben, ebenso wie zum Beispiel das Kontrollieren oder Justieren, zu den Sekundärvorgängen, da diese Vorgänge nur Zeit, Informationen und Energie verbrauchen, ohne zur Wertschöpfung des Endproduktes beizutragen. Ein Primärvorgang, der eine Wertschöpfung bewirkt, ist in der Montage das Fügen. Dazu zählen Zusammensetzen, Füllen, Schweißen, Kleben, usw. Um die Montage zu optimieren, herrscht das Bestreben die Sekundärvorgänge zu reduzieren. Dadurch erhöht sich der Montagewirkungsgrad.

Nach dem Aufbauen der Funktionsfolgen lassen sich die Taktzeiten der Stationen mit Hilfe von Weg-Schritt-Diagramme darstellen und bewerten. Somit können Engpassstationen erstellt und ggf. ersetzt werden. Dazu ist zu untersuchen, ob die Arbeitsinhalte bzw. Handhabungsfunktionen der Engpassstation auf anderen Stationen verteilt werden können.

Eine Baugruppe bewegt sich während des Montageprozesses durch mehrere Stationen. Diese Stationen sind oftmals durch ein Transfersystem verkettet. Die verketteten Montagestationen können, je nach Taktzeiterfordernissen, als Reihenverkettung, Parallelverkettung und Reihen-Parallel-Verkettungen ausgestaltet werden. Die Arbeitsinhalte bzw. Funktionen der Engpassstation können in folgende Stationen zugeordnet werden:

Aufteilung in Reihenstationen: Die Handhabungsfunktionen werden den Reihenfolgestationen zugeordnet. Durch das Erstellen von Funktionsfolgen lässt sich die Taktzeit der Station berechnen, was zum Taktzeitdiagramm führt. Gibt es eine klare Engpassstation im System, wird die Funktionsfolge dieser Station auf andere Stationen umverteilt, was zu einer Reduzierung der Taktzeit des Montageprozesses führt (s. **Abb. 5.3**).

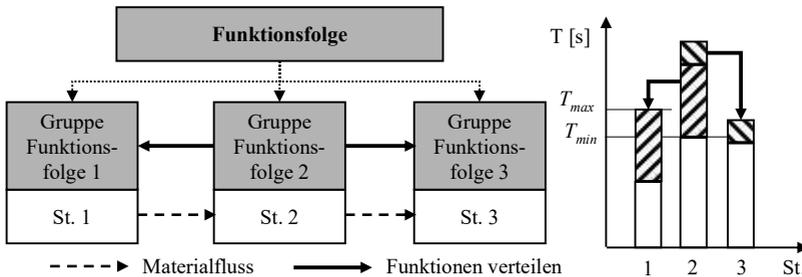


Abb. 5.3: Aufteilung der Arbeitsinhalte in einer Reihenverkettung

Aufteilung in Parallelstationen: Die Handhabungsfunktionen werden den Parallelstationen zugeordnet. Im Beispiel gemäß **Abb. 5.4** ist die Taktzeit von Station 2 die längste und wird daher auf zwei Parallelstationen verteilt. Einhergehend mit der Aufteilung des Werkstückflusses auf zwei oder mehrere Parallelstationen sind hierbei die ggf. wesentlich steigenden Anlagenkosten zu berücksichtigen.

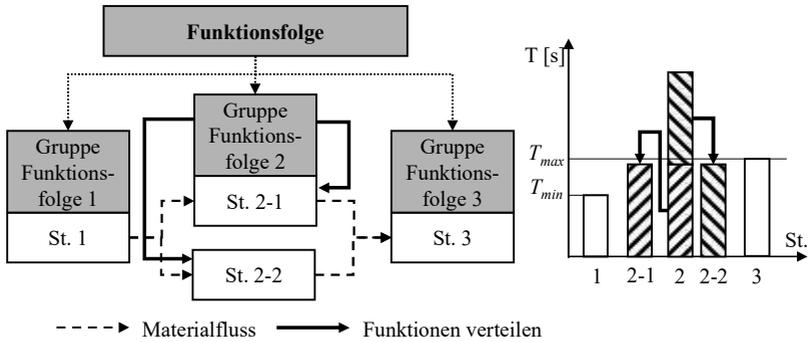


Abb. 5.4: Aufteilung der Arbeitsinhalte in einer Parallelverkettung

Aufteilung in Reihen-Parallelstationen: Die Funktionen werden auf parallele Stationen sowie andere Stationen aufgeteilt (s. **Abb. 5.5**).

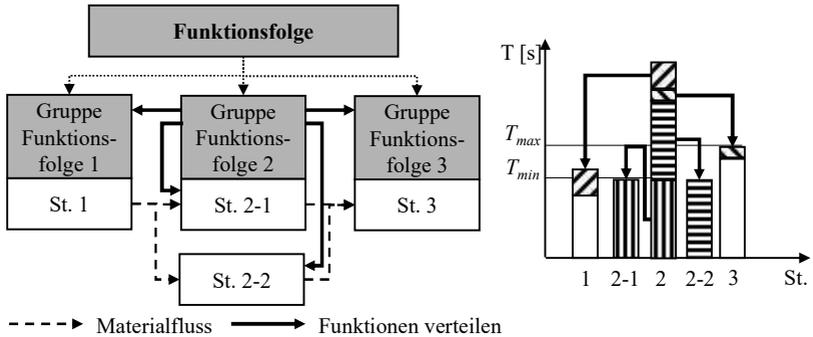


Abb. 5.5: Aufteilung der Arbeitsinhalte in einer Reihen-Parallel-Verkettung

5.2 Feinplanung des Montagesystems

5.2.1 Suche der Funktionsträger

Um einen Funktionsträger zu ermitteln, müssen die Detailanforderungen festgelegt werden, die natürlich von Funktionsträger zu Funktionsträger variieren. Basierend auf den erstellten Funktionsfolgen werden die Anforderungslisten für alle Anlagenkomponenten erstellt, was den Ausgangspunkt für die Ermittlung der Funktionsträger bildet. Zur Auswahl einer Lösung sollte der Entwickler folgende Faktoren berücksichtigen:

- Arbeitsprinzip: freie oder zwanghafte Bewegung der Werkstücke, Bewegungsart der Funktionsträger
- konstruktive Gestaltung und Qualität der Funktionsträger
- äußere Randbedingungen: Einsatzgebiet, Umwelтанforderungen, usw.
- geringer Handhabungsaufwand durch Standardisierung der Funktionsträger

Abb. 5.6 zeigt die allgemeinen Schritte zur Erstellung einer Anforderungsliste bis hin zur Auflistung der Funktionsträgervarianten basierend auf den symbolischen Funktionsfolgen, durch die bereits zu Beginn der Planung die Funktionsträgerprinzipien festgelegt werden. Diese Informationen werden zusammen mit den Startlagen der Werkstücke, bekannt aus den 3D-Funktionsfolgen, in den parametrischen Symbolen hinterlegt. Weitere Anforderungsparameter, wie Bewegungszeit, Kostenbegrenzung, sind ebenfalls im Symbol hinterlegt. Aufgrund des darstellungsbeschränkten Parameterraums der Symbole, können nicht alle notwendigen Informationen implementiert werden. Für eine vollständige Anforderungsliste ist es somit erforderlich, zusätzliche Anforderungen, wie Kraft- und Drehmoment, Leistung, Hauptabmessungen der Funktionsträger: max. Höhe, Breite und Länge, Antriebsprinzipien, usw., manuell in die Listen zu übernehmen.

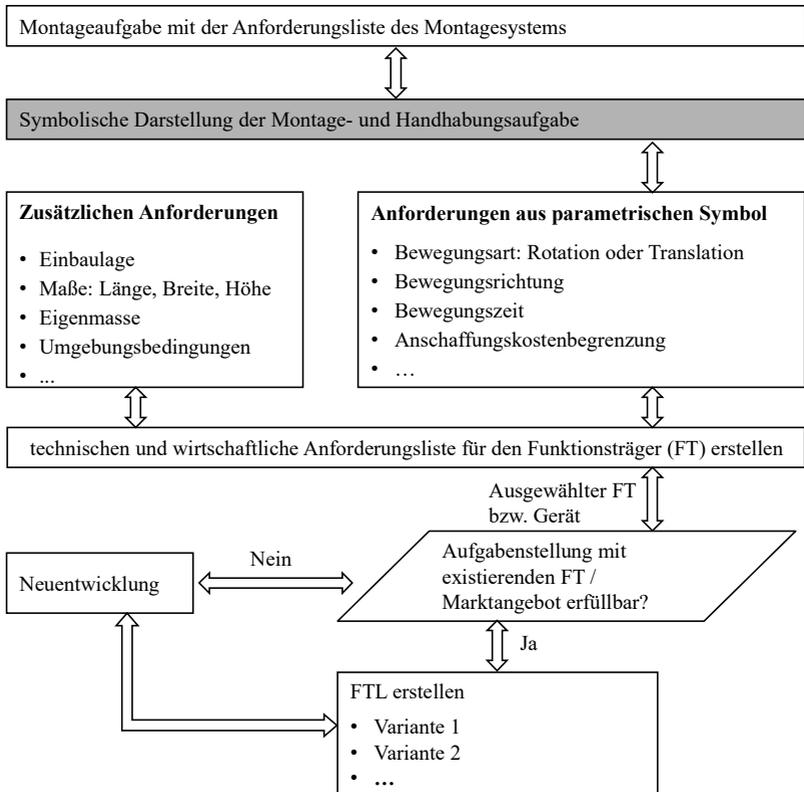


Abb. 5.6 Allgemeine Schritte zur Suche der Funktionsträgervarianten

Gemäß der Anforderungsliste werden die FTV aus den am Markt verfügbaren Lösungen ausgewählt und in die FTL übernommen. Wenn ein Funktionsträger nicht als Standardlösung verfügbar oder in ähnlicher Form vorhanden ist, kann die Anforderungsliste verändert werden oder es muss eine Neuentwicklung in Auftrag gegeben werden.

Die Erstellung einer Anforderungsliste soll nachfolgend an einem Beispiel illustriert werden. Ein Werkstück (Bolzen) wird in einem Magazin gespeichert und von einer Startlage 1 zu einer Endlage 2 zugeteilt. Mit Hilfe des

parametrischen Symbols "Zuteilen" werden die Anforderungsinformationen, wie Startbedingungen, Bewegungszeit, Anschaffungskosten, etc., vorgegeben.

Zur Auswahl eines Antriebsprinzips für den Zuteilschieber muss die Antriebskraft berechnet werden. Ausgehend von der Antriebskraft und anderen technischen Randbedingungen, wie Umgebung, Abmessungen, usw., wird die Anforderungsliste für den Zuteilschieber erstellt. Somit kann die Funktionsträgerliste mit geeigneten Funktionsträgern gefüllt werden. **Tabelle 5.1** zeigt ein Beispiel für drei potentielle Funktionsträger. Die Verfahrzeiten der Varianten wurden aus den Produktkatalogen entnommen, die Kosten sind jedoch nur geschätzt.

Tabelle 5.1: Technischen Lösungen für Vertikalschlitten mit einem Hub von 80 mm

Anforderungsliste	Funktionsträgervarianten		
	<i>Variante 1</i>	<i>Variante 2</i>	<i>Variante 3</i>
	LM-4S-90	CLM 100-H100	LM-4SE-90
Nutzhub: 80 [mm]	80	100	90
Antriebskraft: ab 2,5 [N]	100	294	350
Verfahrzeit [s]: bis 0,35	0,27	0,19	0,24
min. Wiederholgenauigkeit [mm]: $\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
Umgebung: Normal, Sauber	0 - 60°C	5 - 60°C	0 - 60°C
max. Gesamtlänge [mm]: 310	220	237	300
Kosten [€]: bis 1500	800	892	1200

5.2.2 Erstellung der Funktionsfolge mit parametrischen Symbolen

Die im Funktionssymbol gespeicherten Daten sollen dazu dienen, die Suche und Bewertung geeigneter Funktionsträger effizient zu unterstützen. Während einer Anlagenentwicklung wird es erforderlich sein, auch einige dieser Daten immer wieder zu adaptieren bzw. zu aktualisieren, wie z. B. die Ausführungszeit t_{Dauer} oder die zu erwartenden Kosten, da diese direkt vom ins Auge gefassten Funktionsträger abhängen, oder, sofern es hierfür noch keinen Anbieter gibt, vorab zu schätzen sind.

Es eröffnen sich aber nun auch viele weitere Möglichkeiten im Rahmen der symbolischen Anlagenplanung, wie z. B. derartige Liste bzgl. unterschiedlicher Varianten unternehmensspezifisch zu erstellen und/oder diese datenbankbasiert – zukünftig ggf. sogar direkt web- und damit lieferantenbasiert – abzurufen und damit Vergleichsbetrachtungen zu vereinfachen und Aussagen im Planungsprozess zu präzisieren.

Nachdem die Varianten der Funktionsträger ermittelt wurden, werden diese sowie weitere Informationen in die parametrischen Symbole eingegeben. Wird nun eine Variante ausgewählt, werden alle technischen Anforderungen automatisch erfüllt. Die Varianten, z. B. in Tabelle 5.1, werden so erstellt und deren technische Parameter ausgefüllt.

Durch die Auswahl einer Variante in der Liste von "SHAPE-DATEN-ZUTEILEN" werden die Kosten und Zeitdauer im parametrischen Symbol "Zuteilen" übernommen. Die anderen Informationen, wie Bedingungen, Anzahl, Start- und Endposition im parametrischen Symbol, werden über die "SHAPE-DATEN-ZUTEILEN" eingegeben (s. **Abb. 5.7**).

SHAPE-DATEN - ZUTEILEN	
Zuteilen	
Bedingungen:	Werkstückabfrage mit Lichtsensor
t_Start(s):	0
t_Dauer(s):	0,27
n (Stk):	1
(S) Px; Py; Pz (mm):	138; 251; 60
(E) Px; Py; Pz (mm):	195; 195; 60
Rotation (°):	
Dx; Dy; Dz (mm):	0,1; 0,1; 0
Variante:	LM-4S-90
Kosten (€):	LM-4S-90 CLM100-H100 LM-4SE-90

Zuteilen	
Bedingungen:	Werkstückabfrage mit Lichtsensor
t_Start(s):	0
t_Dauer(s):	0,27
n (Stk):	1
(S) Px; Py; Pz (mm):	138; 251; 60
(E) Px; Py; Pz (mm):	195; 195; 60
Rotation (°):	
Δx; Δy; Δz (mm):	0,1; 0,1; 0
Variante:	LM-4S-90
Kosten (€):	800

Abb. 5.7: automatische Erfüllung der Zeitdauer und Kosten

Zur Ermittlung der Gesamtzeit von Funktionsfolge wird eine Startzeit t_{start} eines Symbols festgelegt. Die erste Funktion in die Funktionsfolge hat die Startzeit $t_{\text{start}} = 0$. Die Beziehungen zwischen den Funktionen, z. B. Funktion B und Funktion A, werden nach Zeit definiert. Die Funktion B kann gleichzeitig oder nachfolgend zur Funktion A anlaufen (s. Gleichung (5.1)). Wenn die Funktion B nach dem Ende von Funktion A ausgeführt wird, ist die Zeit $\tau = t_{\text{Dauer}}^A$. Die Zeitdauer einer Funktion hängt von der ausgewählten Variante im parametrischen Symbol ab.

$$t_{\text{Start}}^B = t_{\text{Start}}^A + \tau, \quad \tau \geq 0 \quad (5.1)$$

Nach der Erstellung der Varianten und Definition der Verbindungen der parametrischen Symbole lassen sich diese Symbole anordnen und durch die Pfeile miteinander verknüpfen. **Abb. 5.8** zeigt ein Beispiel für die Funktionsfolge zum Zuteilen und Übergeben eines Bolzens. Die Schnittstellen der Funktionsfolgen werden durch die Eingangs- und Ausgangsparameter wie die Positionen und Orientierungen bestimmt.

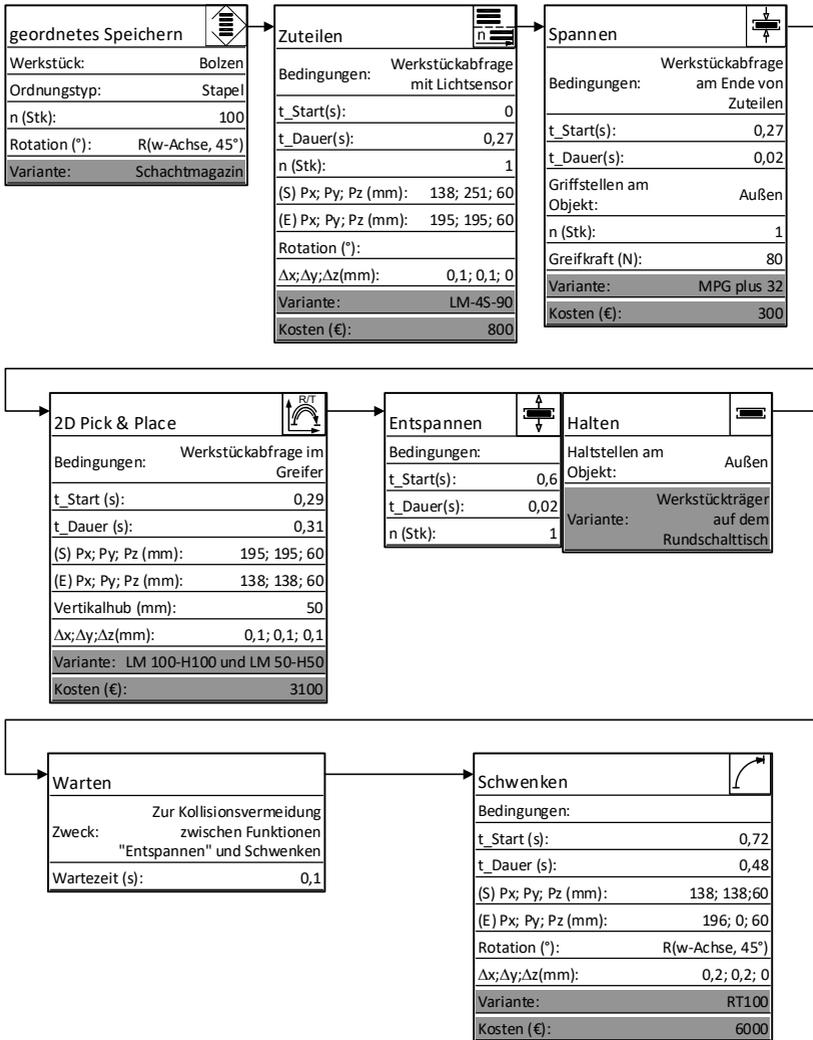


Abb. 5.8: Funktionsfolge mit parametrischen Symbolen

Um eine Übersicht über die Gesamtzeit und -kosten, Ausführungszeiten, Kosten nach der Auswahlen jeder Variante in die Drop-Down-Listen für eine

Station sowie ein Montagesystem zu geben, werden zwei Balkendiagramme erstellt. Wird eine Variante im Symbol ausgewählt, erscheinen die Zeiten und Kosten in die Balkendiagramme. Diese Balkendiagramme werden durch die folgenden Schritte durchgeführt:

- Berechnung der Gesamtzeit einer Station: In die Funktionsfolge wurde nur die Startzeit der letzten Funktion festgestellt und die Gesamtkosten noch nicht berechnet. Zur Bestimmung werden Shape-Daten erzeugt und auf die Werte in den parametrischen Symbolen zugegriffen. Die Gesamtzeit wird durch die letzte Funktion in die Funktionsfolge definiert.
- Ermittlung der Gesamtkosten einer Station: Gemäß der ausgewählte FTV von einem Funktionsträger wird die Kosten des Funktionsträgers festgelegt. Die Gesamtkosten werden über die Kosten aller ausgewählten Funktionsträgervarianten mit den Kosten summiert.
- Erzeugung der Shape-Daten für ein Gesamtzeit und -kosten: Der Inhalt des Diagramms ist davon abhängig, welche Funktionsträger in die Balkendiagramme hinzugeführt werden. Somit werden die Beschriftungen und Datenbalken erzeugt. In **Abb. 5.9** werden die Beschriftungen Gesamtzeit, Zuteilen usw. definiert und dann die Datenbalken gemäß den Beschriftungen erstellt.



Abb. 5.9: Beispielhaftes Balkendiagramm von Ausführungszeiten und Anschaffungskosten

5.3 Minimale Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten

5.3.1 Aufgabenstellung

Ein Montagesystem umfasst verschiedene Stationen, wobei eine Station aus den unterschiedlichen Funktionsträgern besteht (s. **Abb. 5.10**). Bei manueller Auswahl der Funktionsträgervarianten (FTV) werden die Gesamtausführungszeiten und Gesamtanschaffungskosten berechnet. Für ein Montagesystem mit verschiedenen Stationen und FTV ist die manuelle Auswahl mühevoll, um die geeigneten FTV mit den vorgegebenen Bedingungen wie Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten auszuwählen. Aus diesem Grund soll ein Optimierungsprogramm geschrieben werden. Damit werden die geeignetsten FTV unter vorgegebenen Bedingungen ausgewählt und die Auswahlzeit reduziert.

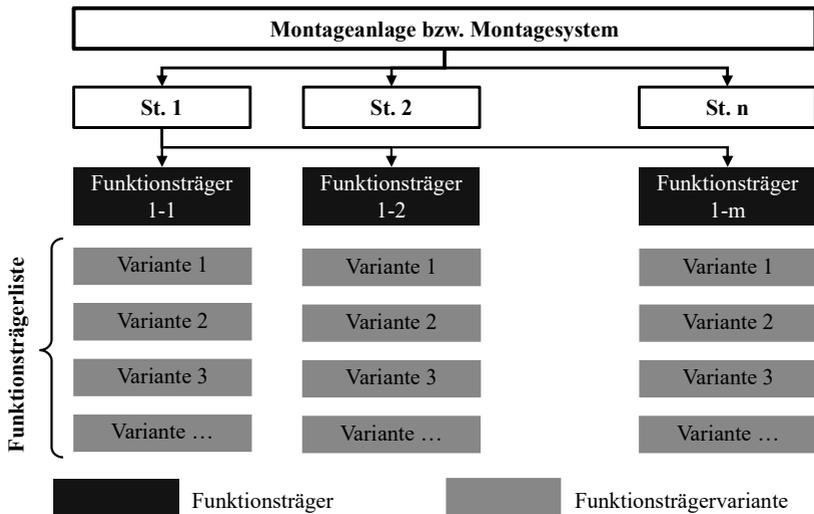


Abb. 5.10: Auswahlmöglichkeiten der Varianten zum Aufbau einer Montageanlage

Zur Unterstützung der Entwicklung eines Montagesystems muss das Optimierungsprogramm die folgenden Aufgaben lösen:

- Berechnung der Taktzeiten und Gesamtkosten aller Stationen des Montagesystems
- Minimierung der Taktzeit des Systems nach vorgegebenen Kosten
- Ausgleich der Zeitunterschiede zwischen den Stationen durch die Auswahl der Anlagenkomponenten nach der Taktzeit des Systems und den minimalen Anschaffungskosten.

5.3.2 Methodische Gesichtspunkte

Erstellung der Weg-Schritt-Diagramme

Basierend auf den Funktionsfolgen werden die Bewegungen bzw. Aktionen aller Funktionsträger festgelegt. Die Einzelbewegung eines Funktionsträgers in der Station beeinflusst deren Taktzeit. Um die Taktzeit einer Station zu ermitteln, müssen alle Einzelbewegungen dargestellt werden. Ausgehend von Weg-Schritt-Diagramme werden die Bewegungen der Funktionsträger sowie Steuerungsplanung beschrieben. Die Bewegungsabläufe einer Maschine oder Anlage werden in verschiedene Schritte aufgeteilt. Eine Zustandsänderung, z. B. das Schalten eines Rundschalttisches, Anfahren oder Stillsetzen einer Schlitteneinheit, wird als Schritt bezeichnet. Ein Zyklus beginnt mit dem Schritt 1 und endet mit dem Schritt n (s. **Abb. 5.11**). Nach Beendigung des letzten Schrittes n beginnt ein neuer Zyklus.

Zur Definition der Zeitvariablen der Funktionsträger sowie Taktzeit einer Station werden die Änderungspunkte in die Weg-Schritt-Diagramme bezeichnet. Z. B. für den Funktionsträger Oszillierende Bewegung (OB) werden acht Änderungspunkte OB 1 bis OB 8 definiert. Somit unterscheiden sich die Zeitpunkte dieses Funktionsträgers mit den Zeitpunkten von anderen Funktionsträgern.

Eingangsparameter

Das Optimierungsprogramm wählt die Funktionsträgervarianten (FTV) aus der Funktionsträgerliste (FTL) nach den definierten Restriktionen. Deshalb dienen die FTL als die Eingangsparameter des Optimierungsproblems.

Die Ausführungszeit und Anschaffungskosten einer FTV sind die Kriterien für die Auswahlentscheidung. Deshalb müssen die Zeiten, z. B. Prüf- oder Messzeit, Bewegungszeit oder Reaktionszeit des Funktionsträgers sowie die Anschaffungskosten, in den Datenbanken gegeben werden.

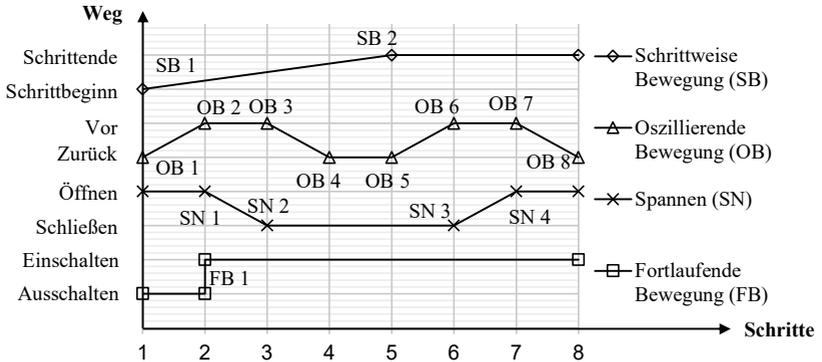


Abb. 5.11: Weg-Schritt-Diagramm einer Station

Ausgehend von der gefundenen FTL (s. Kapitel 5.2) werden die Datenbanken für die Funktionsträger erstellt. Diese Datenbanken umfassen unbedingt die Menge aller Funktionsträger sowie FTL mit der Ausführungszeiten und Anschaffungskosten (s. **Abb. 5.12**).

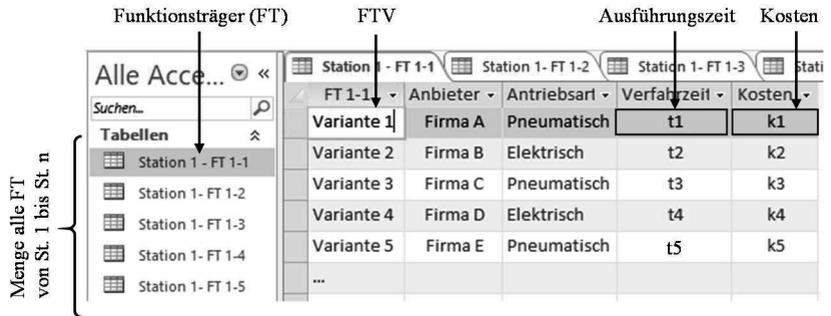


Abb. 5.12: Gliederung von Datenbank eines Montagesystems in MS Access

Standardform

Stufe 1: Minimierung der Taktzeit

In diesem Abschnitt wird die Taktzeit T des gesamten Montagesystems durch die größten Taktzeiten aller Stationen minimiert. Die Taktzeit des Montagesystems T wird durch die langsamste Station bestimmt.

$$T = \max_{\sigma \in \mathbb{S}} T_{\sigma} \quad (5.2)$$

wobei:

\mathbb{S} — Menge aller Stationen des gesamten Montagesystems

T_{σ} — Taktzeit einer Station $\sigma \in \mathbb{S}$

Die Taktzeit der Station σ wird durch alle größten Zeitpunkte der Funktionsträger des Weg-Schritt-Diagramms definiert:

$$T_{\sigma} = \max_{\substack{\kappa \in \mathbb{F}_{\sigma} \\ \delta \in \Delta_{\kappa}^{\sigma}}} t_{\kappa, \delta}^{\sigma}, \quad \forall \sigma \in \mathbb{S} \quad (5.3)$$

wobei:

\mathbb{F}_{σ} — Menge aller Funktionsträger der Station $\sigma \in \mathbb{S}$

Δ_{κ}^{σ} — Menge der Änderungspunkte im Weg-Schritt-Diagramm des Funktionsträgers $\kappa \in \mathbb{F}_{\sigma}$ in der Station σ

$t_{\kappa, \delta}^{\sigma}$ — Zeitpunkt entsprechend der Zustandsänderung $\delta \in \Delta_{\kappa}^{\sigma}$ eines Funktionsträgers κ in der Station σ

Die Minimierung der Taktzeit T gilt daher für ein Minimax-Optimierungsproblem; d.h. konkret ist die Zielfunktion die Minimierung der maximalen Taktzeiten aller Stationen:

$$\min T = \min \left(\max_{\sigma \in \mathbb{S}} T_{\sigma} \right) = \min \left(\max_{\substack{\sigma \in \mathbb{S} \\ \kappa \in \mathbb{F}_{\sigma} \\ \delta \in \Delta_{\kappa}^{\sigma}}} t_{\kappa, \delta}^{\sigma} \right) \quad (5.4)$$

Momentan weist die Zielfunktion (5.4) Nichtlinearität auf, kann jedoch einfach durch eine Reihe von Nebenbedingungen umformuliert und linearisiert werden:

Zielfunktion $\min T$

unter den **Nebenbedingungen**

$$T \geq T_{\sigma}, \quad \forall \sigma \in \mathbb{S} \quad (5.5)$$

$$T_{\sigma} \geq t_{\kappa, \delta}^{\sigma}, \quad \forall \sigma \in \mathbb{S}, \kappa \in \mathbb{F}_{\sigma}, \delta \in \Delta_{\kappa}^{\sigma}$$

Zum Zusammenschrumpfen der vielen obigen Nebenbedingungen können die Endzeitpunkte der Zyklen jeder Station im Voraus bestimmt werden (z.B. wenn der Hauptgreifer einer Station wieder vollständig ist.) In Kapitel 6 wird eine konkrete Probleminstanz veranschaulicht.

Außerdem müssen die Zeitpunkte aller Funktionsträger in aller Stationen auch definiert werden. Diese Zeitpunkte werden durch die folgenden Bedingungen bestimmt:

- Beziehungen zwischen den Zeitpunkten der unterschiedlichen Funktionsträger in einer Station sowie anderen Stationen:

Im Schritt des Weg-Schritt-Diagramms können ein oder mehrere Zustandsänderungen stattfinden. Um die Zeitpunkte dieser Zustandsänderungen zu berechnen, müssen die Beziehungen zwischen ihnen betrachtet werden. Z. B. in einem Schritt einer Station σ beendet ein Bewegungszeitpunkt $t_{\kappa,\delta}^\sigma$ eines Funktionsträgers κ , beginnt ein Bewegungszeitpunkt $t_{\tilde{\kappa},\delta}^\sigma$ eines Funktionsträgers $\tilde{\kappa}$. Somit müssen solche Beziehungen durch die folgende Nebenbedingung dargestellt werden:

$$t_{\tilde{\kappa},\delta}^\sigma \geq t_{\kappa,\delta}^\sigma \quad (5.6)$$

Um eine Startzeitbewegung eines Funktionsträgers im Schritt 1 (Zyklusanzug) zu feststellen, wird deren Zeitpunkt gleich 0 zugewiesen.

- Beziehungen zwischen den Start- und Endzeitpunkten eines Funktionsträger:

Für eine Ausführung p (z. B. das Öffnen oder Schließen eines Greifers) eines Funktionsträgers κ einer Station σ gibt es einen Startzeitpunkt $t_{\kappa,p_{\text{START}}}^\sigma$ so wie einen Endzeitpunkt $t_{\kappa,p_{\text{ENDE}}}^\sigma$, deren Unterschied die eigentliche Betriebszeit der Ausführung p darstellt. Deshalb muss die folgende Nebenbedingung gelten:

$$t_{\kappa,p_{\text{ENDE}}}^\sigma - t_{\kappa,p_{\text{START}}}^\sigma \geq t_{\kappa,p}^\sigma \quad (5.7)$$

wobei: die positive Variable $t_{\kappa,p}^\sigma$ auf der rechten Seite die mindeste eigentliche Betriebszeit der Ausführung p (d.h. die untere Grenze der linken Seite) darstellt und von der für den Funktionsträger κ ausgewählten Funktionsträgervariante (FTV) abhängt. Es ist zu beachten, dass die Nebenbedingung (5.7) wegen der Berücksichtigung

von der Nebenbedingung (5.6) nicht unbedingt eine Gleichung sein muss.

Meist muss die rechte Seite der Nebenbedingung (5.7) nicht nur für eine einzige Funktionsträgervariante (FTV), sondern auch für die Funktionsträgerliste (FTL) betrachtet werden, die einen Funktionsträger κ entspricht. Deshalb wird eine binäre Variable $\lambda_{\kappa,v}^\sigma$ für eine FTV v der bestimmten FTL eingeführt. Der Wert der binären Variable $\lambda_{\kappa,v}^\sigma$ zeigt, ob eine FTV v in der FTL eines Funktionsträgers κ ausgewählt wird.

$$\lambda_{\kappa,v}^\sigma = \begin{cases} 1, & \text{ausgewählt} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.8)$$

Für einen Funktionsträger κ darf nur eine FTV v ausgewählt werden. Deshalb wird Summe der Werte von binären Variablen geschrieben:

$$\sum_{v \in \Gamma_\kappa} \lambda_{\kappa,v}^\sigma = 1, \quad \forall \sigma \in \mathbb{S}, \kappa \in \mathbb{F}_\sigma \quad (5.9)$$

wobei:

Γ_κ — Menge aller FTV des Funktionsträgers $\kappa \in \bigcup_{\sigma \in \mathbb{S}} \mathbb{F}_\sigma$

Somit wird die Variable $t_{\kappa,p}^\sigma$ neu definiert:

$$t_{\kappa,p}^\sigma = \sum_{v \in \Gamma_\kappa} \tau_v^p \cdot \lambda_{\kappa,v}^\sigma, \quad \forall \sigma \in \mathbb{S}, \kappa \in \mathbb{F}_\sigma, p \in \mathbb{P}_\kappa^\sigma \quad (5.10)$$

wobei:

- \mathbb{P}_κ^σ — Menge aller Ausführungen/Prozesse des Funktionsträgers κ der Station σ . Es ist zu beachten, dass $\forall p \in \mathbb{P}_\kappa^\sigma: \{p_{\text{START}}, p_{\text{ENDE}}\} \subset \Delta_\kappa^\sigma$.
- τ_v^p — Katalogparameter, der die Nennausführungszeit der Ausführung p der FTV v des Funktionsträgers $\kappa \in \mathbb{F}_\sigma$ in der Station σ darstellt.

Aus der Gleichung (5.10) wird die Nebenbedingung (5.7) umformuliert:

$$t_{\kappa, p_{\text{ENDE}}}^\sigma - t_{\kappa, p_{\text{START}}}^\sigma \geq \sum_{v \in \Gamma_\kappa} \tau_v^p \cdot \lambda_{\kappa, v}^\sigma, \quad (5.11)$$

$$\forall \sigma \in \mathbb{S}, \kappa \in \mathbb{F}_\sigma, p \in \mathbb{P}_\kappa^\sigma$$

Stufe 2: minimale Gesamtanschaffungskosten gemäß der Bedingungstaktzeit

In Stufe 1 werden die Taktzeiten aller Stationen minimiert. Das bedeutet, nur die FTV mit den kleinsten Ausführungszeiten aus allen FTL werden ausgewählt. Deshalb enthalten alle Stationen die FTV mit den kürzesten Ausführungszeiten. Somit gibt es häufig unterschiedliche Zykluszeiten zwischen diesen Stationen. Die Stationen, die Zykluszeiten kleiner als die Taktzeit des Montagesystems T besitzen, haben wahrscheinlich die ungünstigsten FTV. Eine Lösung für dieses Problem ist, die Erhöhung der Zykluszeiten und Senkung der Anschaffungskosten der FTV. Aus diesem Grund wird das Optimierungproblem in Stufe 2 ausgeführt. Für die zweite Stufe werden die günstigsten FTV gesucht, sodass die neuen Zykluszeiten der Stationen die Taktzeit T nicht überschreiten. Die Ergebnisunterschiede zwischen der ersten und zweiten Stufe sind in **Abb. 5.13** zu sehen.

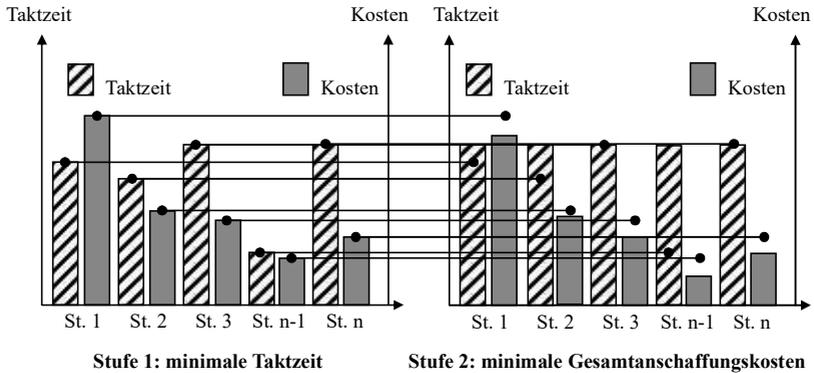


Abb. 5.13: Unterschiede zwischen der Stufe 1 und 2

Es ist wesentlich in Stufe 2, um die Gesamtkosten zu beachten und in das Modell zu integrieren. Zur Optimierung der Gesamanschaffungskosten müssen die Gesamanschaffungskosten aller ausgewählten FTV minimiert werden. Die Anschaffungskosten einer FTV v des Funktionsträgers κ wird c_v genannt. Somit wird die **Zielfunktion** der Stufe 2 definiert.

$$\min C_{\text{GESAMT}} \Leftrightarrow \min \sum_{\sigma \in \mathbb{S}} \sum_{\kappa \in \mathbb{F}_\sigma} \sum_{v \in \Gamma_\kappa} c_v \cdot \lambda_{\kappa,v}^\sigma \quad (5.12)$$

unter den **Nebenbedingungen**

- Nachdem die FTV ausgewählt werden, wird die von Stufe 1 ermittelte Taktzeit T^* des Systems als ein Eingabeparameter dienen, den die Taktzeiten T_σ aller Stationen σ nicht überschreiten dürfen. Deshalb wird eine zusätzliche Nebenbedingung eingeführt.

$$T \leq T^* \quad (5.13)$$

- Bedingungen für die Beziehungen zwischen den Zeitpunkten der Funktionsträger in Stufe 1

Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten Diagramm

Nachdem das Optimierungsproblem nach Stufe 1 und 2 gelöst wurde, wird nur die minimale Taktzeit gemäß den minimalen Gesamtanschaffungskosten ausgegeben. Eigentlich ist die minimale Taktzeit oft kein Primärziel zur Auswahl einer Anlage. Ein Planer will wissen, wie viel eine Anlage mit einer gegebenen Taktzeit kostet oder wie lang die Taktzeit einer Anlage bei gegebenen Kosten dauert.

Durch manuelle Veränderung der FTV lassen sich die unterschiedlichen Werte der Taktzeit T und Gesamtkosten C_{GESAMT} ermitteln. Aber diese Veränderung würde so viel Rechenaufwand erfordern und ist daher für ein solches System mit zahlreichen FTV nicht geeignet. Um dieses Problem zu lösen, sind die Gesamtkosten auf einen Parameter C_{GESAMT}^* begrenzt, und so wird eine zusätzliche Beschränkung in Stufe 1 eingeführt.

$$\sum_{\sigma \in S} \sum_{\kappa \in F_{\sigma}} \sum_{v \in I_{\kappa}} c_v \cdot \lambda_{\kappa,v}^{\sigma} \leq C_{\text{GESAMT}}^* \quad (5.14)$$

Die vorgegebenen Werte C_{GESAMT}^* werden nach Schritt für Schritt verändert. Gemäß jedem Wert C_{GESAMT}^* führt das Optimierungsprogramm aus. Basierend auf den Optimierungsergebnisse wird das Taktzeit-Gesamtkosten-Diagramm erstellt (s. Beispiel in **Abb. 5.14**).

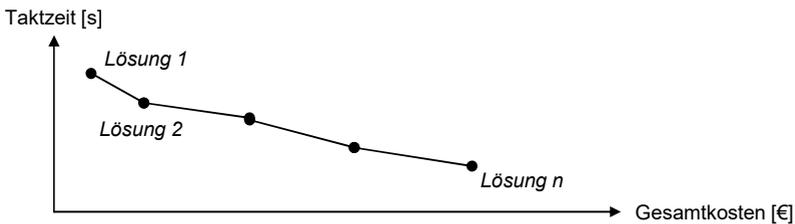


Abb. 5.14: Beispiel für ein Taktzeit-Kosten-Diagramm

5.3.3 Algorithmus zum Lösen des Optimierungsproblems

Zur Minimierung der Taktzeit eines Montagesystems werden nicht nur die besten Funktionsträgervarianten ausgewählt, sondern auch die Arbeitsinhalte bzw. Handhabungsfunktionen den Stationen zugeordnet. Im Allgemeinen wird der Algorithmus zur Minimierung der Taktzeit und Anschaffungskosten in **Abb. 5.15** dargestellt.

Basierend auf dem Produktaufbau wird die Reihenfolge der Arbeitsvorgänge ermittelt. Im Verlauf der Planung müssen die Reihenfolgebedingungen geprüft werden, ob die Arbeitsvorgänge sowie Funktionen weiter aufgelöst oder zusammengefasst werden können. Es wäre besser, wenn die Zeitunterschiede zwischen Stationen 10 Prozent der Taktzeit nicht übertreffen [Lot92]. Neben der Reihenfolgebedingungen sind die technischen Lösungen notwendig zu beachten. Um das Optimierungsproblem zu lösen, besteht das Optimierungsprogramm aus auch zwei Stufen genauso wie die Standardform (mathematische Formulierung).

Stufe 1

Alle Funktionsträger sowie deren FTL werden in **Datenbank 1** hinzugefügt. Somit werden diese FTV als die Eingangsparameter des Optimierungsproblems festgelegt.

Bei einem großen Montagesystem kann das Programm Hundert bis Tausend Variablen enthalten. Um die Optimierungsergebnisse praktisch zu kontrollieren, werden sie in eine Tabelle der Datenbank 1 ausgegeben. **Abb. 5.16** zeigt ein Beispiel für die Ergebnisse von Taktzeit, Gesamtkosten und ausgewählten Elemente der Mengen in der Tabelle "**Lösung_Stufe 1**". Durch Veränderung der gegebenen Gesamtkosten C_{GESAM}^* werden die verschiedenen Lösungen 1 bis n erhalten. Die Taktzeit von Lösung 1 muss am kleinsten sein. Deshalb lassen sich die ausgewählten FTV prüfen, ob diese FTV die geeigneten Ausführungszeiten im Vergleich mit anderen FTV in deren FTL haben.

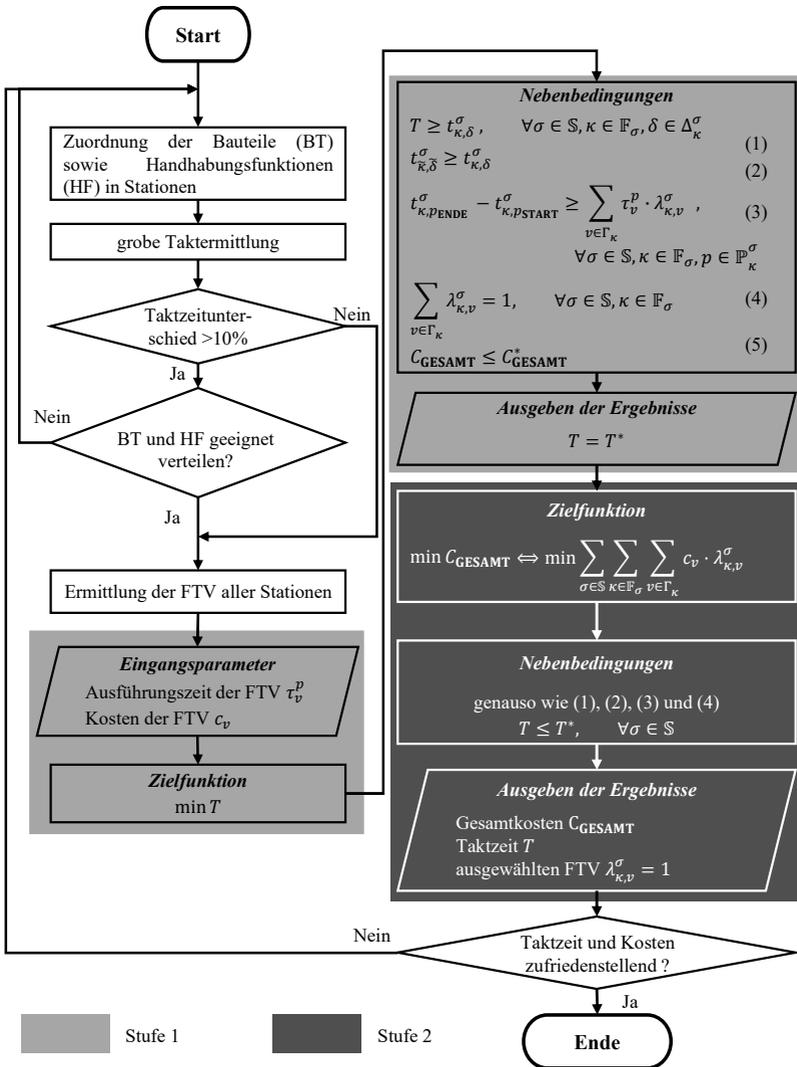


Abb. 5.15: Algorithmus zur Minimierung der Taktzeit und Anschaffungskosten

Lösung_Stufe 1		kleinste Taktzeit	ausgewählten FTV		
Lösung	Taktzeit (s)	Gesamtkosten (€)	Station 1-FT 1-1	Station 1-FT 1-2	
1	T_1	GK_11	Variante 5	Variante 2	
2	T_2	GK_21	Variante 2	Variante 7	
3	T_3	GK_31	Variante 4	Variante 10	
n	T_n	GK_n1	Variante 1	Variante 6	
*					

Abb. 5.16: Ausgeben der Optimierungsergebnisse von Stufe 1 in einer Tabelle

Stufe 2

Die Gestaltung der Stufe 2 ist ähnlich wie die Stufe 1. Die Eingangsparameter werden aus der Datenbank 1 lesen. Die Ergebnisse in Stufe 2 sind die Lösungen des Optimierungsproblems und werden in die Tabelle "*Lösung_Stufe 2*" veröffentlicht (s. **Abb. 5.17**).

Lösung_Stufe 2		unveränderte Taktzeit	veränderten Gesamtkosten, ausgewählte FTV		
Lösung	Taktzeit (s)	Gesamtkosten (€)	Station 1-FT1-1	Station 1-FT1-2	
1	T_1	GK_12	Variante 8	Variante 4	
2	T_2	GK_22	Variante 6	Variante 8	
3	T_3	GK_32	Variante 3	Variante 5	
n	T_n	GK_n2	Variante 10	Variante 17	
*					

Abb. 5.17: Beispielhafte Ergebnisse des Optimierungsproblems

Wenn die Taktzeiten länger oder die Gesamtkosten teurer als das Wunschziel sind, werden diese Lösungen nicht angenommen. Um dieses Problem zu lösen, können zwei Verfahrensweisen durchgeführt werden:

- Erstellung einer neuen Datenbank 1 (**Szenario 1**): Ausgehend von den Optimierungsergebnissen werden die weiteren FTV aus verschiedenen Hersteller bzw. Anbieter gesucht. Somit wird die neue Datenbank 1 erstellt und werden die Optimierungsprogramme der

Stufe 1 und 2 ausgeführt. Deshalb werden die neuen Taktzeiten und Gesamtkosten ermittelt.

- Verteilung der Bauteile und Handhabungsfunktionen (**Szenario 2**): Wenn diese neue Taktzeit und Gesamtkosten nicht passend sind, muss eine neue Schleife ausgeführt werden. Deshalb werden die neuen Funktionsfolgen aufgebaut sowie die neuen FTV berechnet und ermittelt. Aus den neuen Funktionsfolgen werden die Weg-Schritt-Diagramme sowie das Optimierungsproblem erneuert.

6 Anwendungsbeispiel "Chiphalter"

Das folgende Beispiel zeigt die Anwendung des neuen, integrativen Montageplanungssystems von der Grob-, über die Feinplanung bis hin zur Auswahl der Anlagenkomponenten und der Optimierung der Taktzeit sowie der Gesamtanschaffungskosten.

6.1 Aufgabenstellung

Das im Beispiel zu montierende Produkt besteht aus drei Einzelteilen: einer Buchse, einem Chip und einem Chiphalter. Da sowohl der Chip als auch die Buchse in den Chiphalter eingefügt werden, ist der Chiphalter das Basisteil zu betrachten. Die Formgebung und die Abmessungen der Einzelteile sind aus **Abb. 6.1** zu entnehmen.

Anhand des geometrischen Erscheinungsbildes der Einzelteile lassen sich bereits Aussagen über ein mögliches Führungsverhalten ableiten. Die Chips und Chiphalter können stabil auf einer Ebene liegen oder über eine Schräge gleiten. Die Buchsen haben keine Standfähigkeit, können aber beispielsweise in Doppelschienen hängen und gleiten.

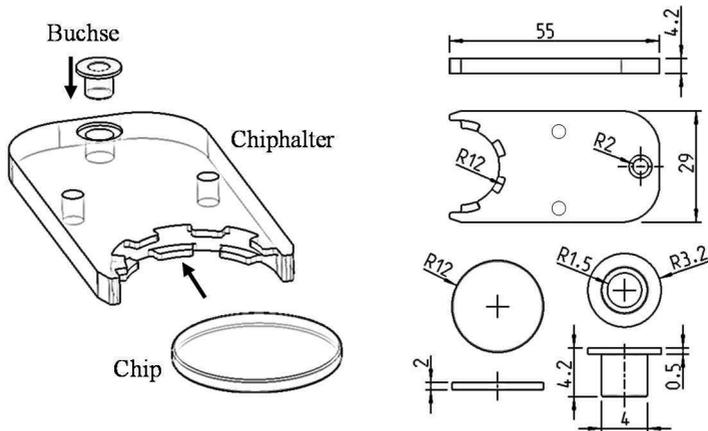


Abb. 6.1: Formen und Maße von Buchse, Chip und Chiphalter

Der Anlieferungszustand der Bauteile ist ebenso wichtig für die Planung der Handhabungsabläufe. In diesem Beispiel liegen die Buchsen und Chips ungeordnet vor, und die Chiphalter geordnet. Zur Vorbereitung der Bestimmung der benötigten Handhabungsfunktionen und Funktionsträger werden die Werkstückmerkmale in **Tabelle 6.1** gelistet.

Tabelle 6.1: Merkmale von Buchse, Chip und Chiphalter

Werkstück	Werkstückverhaltens-typ	Stoff	Masse [in Gramm]	Schütt-fähig-keit	Form-stabi-lität
Chiphalter	Blockteile	Kunst-stoff	5	ja	ja
Chip	Flachteile	Kunst-stoff	0,9	ja	ja
Buchse	Pilzteile	Stahl	0,26	ja	ja

6.2 Grobplanung

6.2.1 Ermittlung der Funktionen

Da die Baugruppe nur drei Bauteile mit insgesamt zwei Fügeoperationen umfasst, ist eine mögliche Montagereihenfolge recht einfach aufzustellen. Der Chiphalter wird durch einen Werkstückträger formschlüssig gehalten und zur ersten Fügeposition, der Montage (Einsetzen) des Chips, transportiert. Anschließend wird die Buchse an einer zweiten Fügeposition eingesetzt. Um eine Grobplanung aufzubauen, werden die folgenden Funktionen analysiert:

Ordnen: Die Lieferzustände der Buchsen und Chips sind chaotisch, weshalb sie im Vorfeld geordnet werden müssen. Zum Ordnen können z. B. Vibrationswendelförderer zum Einsatz kommen. Da es sich bei den Buchsen und den Chips um eher kleine Bauteile, mit den in Tabelle 6.1 und Abb. 6.1 beschriebenen Merkmalen und Abmessungen, handelt, empfiehlt sich eine Speicherung in separaten Bunkern und eine Ordnung mit jeweils einem Vibrationswendelförderer (VWF). Um die Einzelteile zuzuteilen sowie unnötige

Bewegungen während des Handhabens zu vermeiden, müssen die Ordnungszustände nach **Abb. 6.2** hergestellt werden.

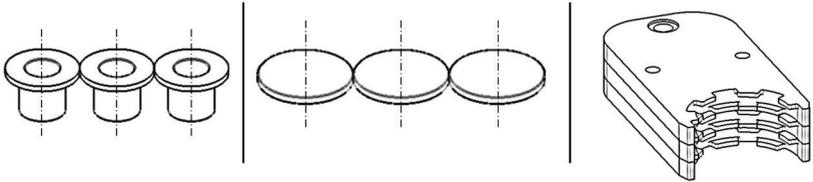


Abb. 6.2: Anordnung nach dem Ordnen

Führen: Nach dem Ordnen durch die VWF werden die Buchsen und Chips zur ihrer Zuteilpositionen geführt. Dies geschieht zum einen mittels einer Hängebahn, in welcher die Buchsen geführt und transportiert werden. Ebenso werden die Chips in einer weiteren Bahn geführt und bewegen sich somit entlang dieser. Hänge- und Führungsbahn dienen gleichzeitig als Magazine, um die Buchsen und Chips in ihrer Lage zu speichern.

Zuteilen: Jeweils ein Chiphalter, eine Buchse und ein Chip werden aus den Magazinen vereinzelt und zur ihrer jeweiligen Zuteilpositionen transportiert. Zur Kontrolle der Bewegungszeiten und der Lagen der Bauteile werden die Bauteile durch Zwangsbewegung zuteilt.

Einlegehandling: Nach dem Zuteilen wird der Chiphalter auf der Werkstückaufnahme platziert. Die Buchse und der Chip werden aus den Endlagen der Zuteiler in den Chiphalter eingesetzt.

Prüfung des Chips im Chiphalter: Nach dem Einfügen des Chips in den Chiphalter muss dessen Anwesenheit und die feste Verbindung geprüft werden. Wenn der Chip fest im Chiphalter geklemmt wurde, ist das Prüfergebnis "in Ordnung" (i.O.), anderenfalls "nicht in Ordnung" (n.i.O.).

Entnahmehandling: Abhängig vom Prüfergebnis wird die montierende Bau-Gruppe (Chiphalter, Chip und Buchse) eingeordnet. Entsprechend dieser Einordnung geschieht der Auswurf in einen Bunker für den Zustand "in Ordnung" oder "nicht in Ordnung".

Verkettung zwischen den Stationen: Die Chiphalter werden auf durch Werkstückaufnahmen formschlüssig gehalten und von einer Station zur anderen Station transportiert.

6.2.2 Aufstellung der Funktionsfolgen

Nach der Ermittlung der Funktionen in Kapitel 6.2.1 werden diese auf fünf Stationen eines Rundtaktsystems verteilt:

- Station 1: Chiphalter Übergabe
- Station 2: Einsetzhandling für Chip
- Station 3: Einsetzhandling für Buchse
- Station 4: Prüfvorrichtung
- Station 5: Auswurfstation

Dieses Kapitel widmet sich ausschließlich der Funktionsfolge von Station 1. Die Stationen 2 bis 5 werden im **Anhang 9.5** ausführlich beschrieben.

Die Chiphalter werden zu Beginn in einem Magazin gespeichert. Aus diesem Magazin wird ein Chiphalter zur Greifposition durch einen horizontal geführten Schlitten mit einem Hub von 200 mm zugeteilt. Ein Greifer übernimmt die Chiphalter aus der Vorrichtung und legt sie in die Werkstückaufnahme ein. Der Greifer wird durch ein Pick & Place Gerät mit einem horizontalen Hub von 200 mm und einem vertikalen Hub von 50 mm geführt. Nach dem Entspannen wird der Chiphalter zur Fügeposition (**FG1**) an der Station 2 im Uhrzeigersinn um 45° geschwenkt.

Nachdem die Funktionsfolge erstellt wurde, werden die Arbeitsprinzipien der Funktionsträger ermittelt. **Anhang 9.1.3** zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Auswahl der Funktionsträger. Die Handhabungsaufgaben der Station 1 werden durch ein translatorisches Zuteilen, einen 2-Parallelbackengreifer, eine Pick & Place Einheit und einen Rundschalttisch realisiert. Bei den Funktionen "Zuteilen" und "Schwenken" wird der Chiphalter an der Außenseite gehalten. Die Handhabungsaufgaben werden durch die Funktionsfolge mit den entsprechenden Handhabungssymbolen und Symbolen für die Funktionsträger nach **Abb. 6.3** formuliert. Das Antriebsprinzip der Funktionsträger wird dabei im Symbol gekennzeichnet.

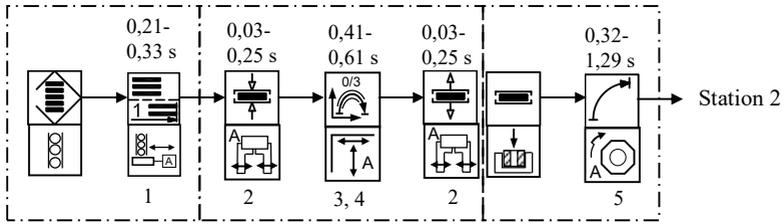


Abb. 6.3: Funktionsfolge der Station 1

Basierend auf den **Tabellen 9.6** und **9.7** lassen sich die Zeiten für die einzelnen Operationen berechnen. Die Ergebnisse sind in die **Tabelle 6.2** dargestellt. Die Schrittzeiten des Rundschalttisches sind dabei unterschiedlichen Produktkatalogen entnommen. Die ermittelten bzw. geschätzten Ausführzeiten der einzelnen Komponenten werden anschließend basierend auf der Funktionsreihenfolge zusammengefasst und geben bereits jetzt eine erste Schätzung der möglichen Ausführzeit von Station 1.

Tabelle 6.2: geschätzte Verfahrzeiten auf Station 1

Nr.	Funktion	Parameter	geschätzte Zeit	
			Pneumatik	Elektrik
1	Chiphalter zuteilen	Hub = 200 mm	t = 0,33 s	t = 0,21 s
2	Chiphalter spannen und entspannen	Parallelgreifer	t = 0,03 s	t = 0,25 s
3	Chiphalter Vertikal-schlitten	Hub = 50 mm	t = 0,14 s	t = 0,1 s
4	Chiphalter Horizontal-schlitten	Hub = 200 mm	t = 0,33 s	t = 0,21 s
5	Werkstückaufnahme schwenken	Drehwinkel 45°	Kurvensteuer t = 0,32 -1,29 s	

In Abb. 6.3 wurden die Handhabungsfunktionen für den Chiphalter in Station 1 dargestellt sowie die Prinzipien der Funktionsträger festgelegt. Diese getroffene Auswahl ermöglicht den konstruktiven Entwurf der Station (s. **Abb. 6.4**). Der Speicher für die Chiphalter ist als Stapelmagazin ausgeführt. Durch die vollständig definierte Anordnung lassen sich diese ohne zusätzlichen Aufwand dem Prozess zuführen. Diese gestapelte Lage wird durch ein U-Profil sowie eine senkrechte Stange realisiert, die mit dem Gestell fest verbunden sind. Durch eine mechanische Abteilung werden die Chiphalter einzelt und dem zweiten Teil der Chiphalterzuführung übergeben. Die Bewegungen zur Übergabe der Chiphalter auf die Werkstückträger werden durch ein Pick & Place Modul, bestehend aus einer Horizontal- und einer Vertikalachse, erzeugt.

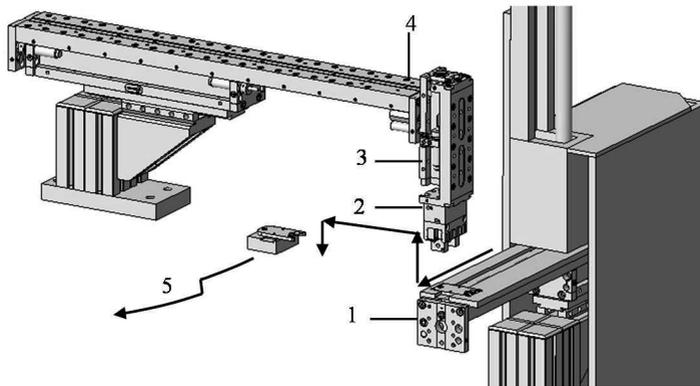


Abb. 6.4: Beispiel für eine Gestaltung der Station 1

Im Rahmen des Funktionsplans werden alle technischen Funktionen der Anlage aufgeführt, gerätetechnisch zusammengefasst (strichpunktierte Umrandung) und stationsweise aufgeschlüsselt, um die Ausführungszeit in Summe zu bestimmen. Hierzu zählen "Chiphalter einlegen STATION 1 (0,44 - 0,86 s)", "Chip einlegen STATION 2 (0,31 - 0,65 s)", "Buchse einlegen STATION 3 (0,41 - 0,79 s)" und "Baugruppe abtransportieren STATION 5 (0,34 - 0,77 s)". Alle Stationen beinhalten sekundäre Handhabungsvorgänge, welche in ihrer Summe das taktzeitbezogene Optimierungspotential darstellen.

Die zusammengefasste Funktionsgruppe "Chiphalter einlegen" ist mit 0,86 s die langsamste und prinzipiell ein Engpass. Jedoch ist die Differenz der Ausführungszeit zu den anderen Funktionsgruppen sehr gering.

6.2.3 Darstellung der Positionen und Orientierungen von Werkstücken

Im Kapitel 6.2.2 und Anhang 9.5 wurden die Handhabungsfunktionen und Bewegungsrichtungen der Werkstücke beschrieben sowie die Gestalt der Station 1 bis 5 entworfen. Allerdings ist dies nicht ausreichend, um die Positionen und Orientierungen der Werkstücke in Bezug auf ein Bezugskoordinatensystem (BKS) zu definieren. Wenn der Ortswechselplan skizziert wird, lassen sich die Funktionsträger zum Rundtaktautomaten anordnen.

Zur Beschreibung der Positionen und Orientierungen von den Einzelteilen (Chiphalter, Chip und Buchse) müssen das KKS und BKS definiert werden:

- Im Hinblick auf die Anordnung der Station 1 bis 5 im Rundtaktautomaten wird das BKS in dem Mittelpunkt des Rundschtalttisches gelegt. Die Stationen 1 bis 5 werden auf dem BKS angeordnet. Die drei Einzelteile drehen um die z-Achse von den Stationen 1 bis 5.
- Basierend auf den Formen der Einzelteile werden die Richtungen der Achsen der KKS festgelegt und stimmen mit dem BKS überein (s. **Abb. 6.5**).

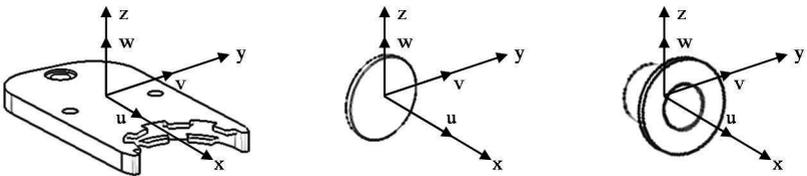


Abb. 6.5: Ausgangssituationen der KKS von Chiphalter, Chip und Buchse

- Die Chiphalter sind im Magazin gespeichert und deren Orientierung ist bestimmt. Im Magazin liegen die w-Achsen der KKS mit der z-

Achsen des BKS zusammen. Die Orientierung des Chiphalters wird durch die Winkelbeziehung zwischen den Achsen des KKS $\left(\overline{u_1^{(1)}}\right)$ und BKS (\vec{x}) von Chiphalter bestimmt. Diese Orientierung wird durch den Chiphalter um $w_1^{(1)}$ -Achse einem Winkel 45° gedreht. Die Orientierung des Chiphalters von den Stationen 1 bis 5 wird durch eine Rotation um w-Achse definiert (s. **Abb. 6.6**).

- Nach dem Ordnen durch den VWF werden die Chips und die Buchsen zu den Magazinen geführt. Bezogen auf das BKS sind sie dabei um 270° entlang der v-Achse ($R(v, 270^\circ)$) rotiert (s. **Abb. 6.6**). Die Orientierungen des Chips und der Buchse in den Stationen 3 bis 5 werden durch eine Rotation um u-Achse dargestellt. Allerdings sind sie nicht wichtig, da Chips und Buchse rotationssymmetrisch sind.

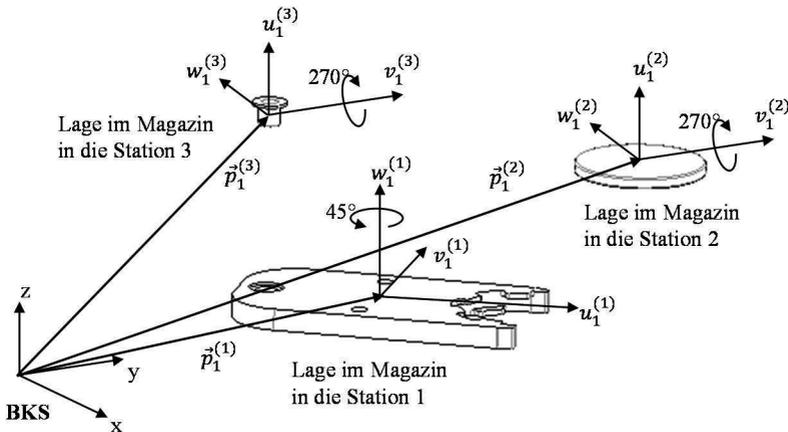


Abb. 6.6: Orientierungen von Chiphalter, Chip und Buchse nach dem Ordnen

Um die Anlagenplanung visuell zu unterstützen und auch die Werkstücklagen zu verfolgen, wird der Ortswechselplan aufgebaut. Dazu wird dieser anhand der definierten Funktionsfolgen räumlich ausgebildet und maßstäblich dargestellt (s. **Abb. 6.7**). Fünf Stationen werden um den Rundschalttisch angeordnet. Der Rundschalttisch hat acht Stopps mit einem Schrittwinkel von 45° und dreht im Uhrzeigersinn. Das BKS der Software "3D Builder" wurde mit der Mitte des Rundschalttisches zusammengelegt. Die Aufbauplattengröße des Rundschalttisches ist mit einem Durchmesser von 1000 mm definiert. Somit sind die Lagen von Chiphalter, Chip und Buchse sowie der Baugruppen auf der Drehscheibe bestimmt. Aus diesen Lagen sowie den Hüben der Linearachsen werden die Lagen der Werkstücke ermittelt und im Plan gekennzeichnet. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit Positionen und Orientierungen zu verändern, z. B.:

- Station 1: Die Hübe der Funktionen Zuteilen und Horizontalverschieben haben einen Wert von 200 mm. Diese Hübe können auf einem Wert von 100 mm bis 150 mm verkürzt werden.
- Der Funktion "Schwenken" ist ein Wert von 45° hinterlegt. Aufgrund des Aufbaudurchmessers sind die Abstände zwischen Stationen sehr groß. Es besteht die Möglichkeit einen Rundschalttisch mit einem Schrittwinkel von $22,5^\circ$ oder 30° (Anzahl der Stopps 16 oder 12) einzusetzen.

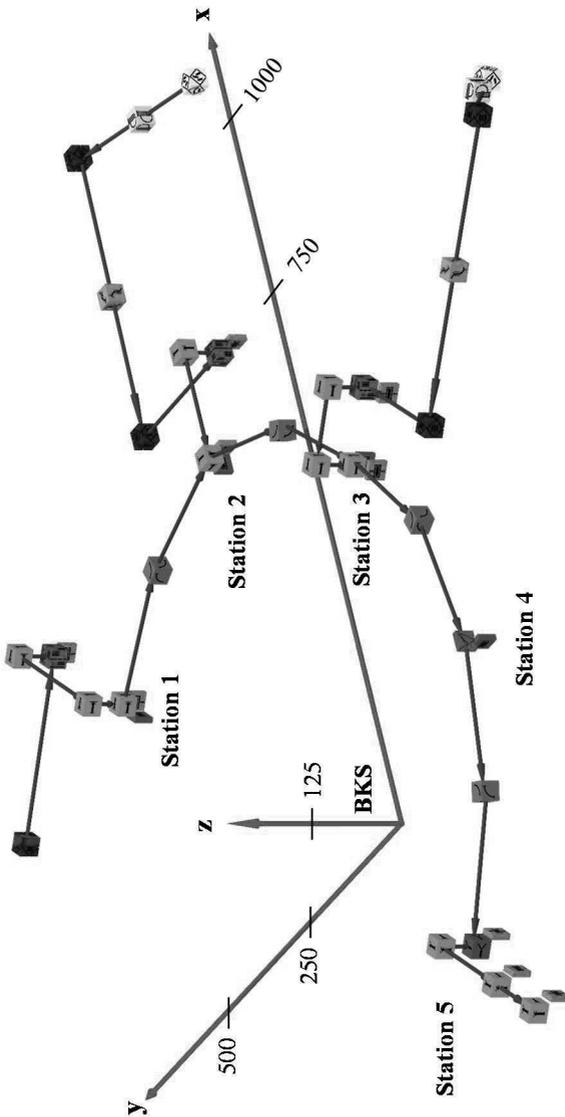


Abb. 6.7: Ortswechselplan des Rundtaktautomaten

6.3 Feinplanung

6.3.1 Funktion Zuteilen

Zur Konfiguration des Rundtaktautomaten werden die Arbeitsräume der Funktionsträger festgelegt, was durch den Ortswechselplan unterstützt wird (vgl. Abb. 6.7). Um die Funktionsträgervarianten (FTV) zu ermitteln und auszuwählen, müssen Anforderungslisten definiert werden.

Jeder Funktionsträger besitzt unterschiedliche Parameter welche mit den produktpezifischen Katalogen abzugleichen sind. In diesem Kapitel wird eine technische Lösung für den Rundtaktautomaten am Beispiel für die **Station 1** erarbeitet. Für die Station 2 bis 5 sind die technischen Lösungen im **Anhang 9.6** zu finden. Die Ausführungszeiten der FTV werden nachfolgend nicht geschätzt, sondern den Produktkatalogen entnommen. Da aber die Kosten der Varianten nicht zur Verfügung standen, mussten diese geschätzt werden.

Die Chiphalter sind im Stapelmagazin gespeichert und bewegen sich durch Schwerkraft nach unten. Ein Chiphalter wird jeweils durch Formschluss gehalten und zur Greifposition verschoben. Die wesentlichen Parameter des Handhabungsablaufs werden in die parametrischen Symbole eingegeben und in **Abb. 6.8** gezeigt.

geordnetes Speichern		Zuteilen	
Werkstück:	Chiphalter	Bedingungen:	Werkstückabfrage mit Lichtsensor
Ordnungstyp:	Stapel	t_Start(s):	0
n (Stk):	100	t_Dauer(s):	0,21-0,33
Rotation (°):	R(w-Achse, 45°)	n (Stk):	1
Variante:	Schachtmagazin	(S) Px; Py; Pz (mm):	347; 630; 150
		(E) Px; Py; Pz (mm):	488; 488; 150
		Rotation (°):	
		$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):	0,1; 0,1; 0
		Variante:	
		Kosten (€):	bis 1450

Abb. 6.8: Parameteridentifikation für die Zuteilung des Chiphalters

Zur Auswahl eines Antriebsprinzips für den Schieberzuteiler muss die Antriebskraft berechnet werden. Das Wirkprinzip des Schieberzuteilers wird in **Abb. 6.9** gezeigt.

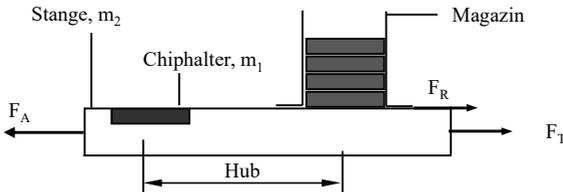


Abb. 6.9: Stapelmagazin mit Schieberzuteiler für die Zuteilung des Chiphalters

Die Antriebskraft am Zuteiler muss größer als die Reibungskraft F_R zwischen Chiphalter im Magazin und der Führungsstange sowie der Trägheitskraft F_T sein. Diese Antriebskraft wird nach Gleichung (6.1) geschätzt [Hes13]:

$$\begin{aligned}
 F_A &= [F_R + F_T] \cdot S_v \\
 &= [n \cdot g \cdot m_1 \cdot \mu + (m_1 + m_2) \cdot \frac{2 \cdot s}{t^2}] \cdot S_v \quad (6.1)
 \end{aligned}$$

wobei:

n — Anzahl von Chiphalter im Magazin, $n = 100 \text{ Stk}$

m_1 — Masse eines Chiphalters in kg, $m_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

m_2 — Masse der Schieberstange, in diesem Beispiel wird eine Schubstange mit den Abmessungen 260 x 70 x 10 [mm] verwendet. Somit beträgt die Masse der Schieberstange $m_2 = 1,4 \text{ kg}$

t — Anforderungsbewegungszeit, $t = 0,21 - 0,33 \text{ s}$

s — Weg, $s = 0,2 \text{ m}$

S_v — Sicherheitsfaktor zum Auswahl der Linearmodule, $S_v = 2$

Somit beträgt die Antriebskraft $F_A = 13,5 \text{ N}$. Mit den zusätzlichen technischen Randbedingungen, wie Umgebung, Abmessungen usw. wird die Anforderungsliste definiert (s. Beispiel in **Tabelle 6.3**).

Tabelle 6.3: Anforderungsliste und Funktionsträger für die Zuteilung des Chiphalters

Anforderungsliste	Funktionsträgervarianten			
	<i>Variante 1</i>	<i>Variante 2</i>	<i>Variante 3</i>	<i>Variante 4</i>
	LM 8 F4-240	LM100-H200	LSX25-200	20036-6200
Nutzhub [mm]: 200	240	200	200	200
Antriebskraft [N]: ab 13,5	394	294	264	240
Verfahrzeit [s]:	0,38	0,33	0,28	0,475
Wiederholgenauigkeit [mm]: $\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
Umgebung: Normal, Sauber	ja	ja	ja	ja
Gesamtlänge [mm]: 400	265	324	272	288
Kosten [€]: bis 1500	700	800	850	650

6.3.2 Gruppe "Spannen-Verschieben-Entspannen"

An der Endlage des Zuteilers wird der Chiphalter durch einen Greifer gefasst und an die Werkstückaufnahme übergeben. Die wichtigen Parameter des Handhabungsablaufs werden in die parametrischen Symbole eingegeben und in **Abb. 6.10** beschrieben.

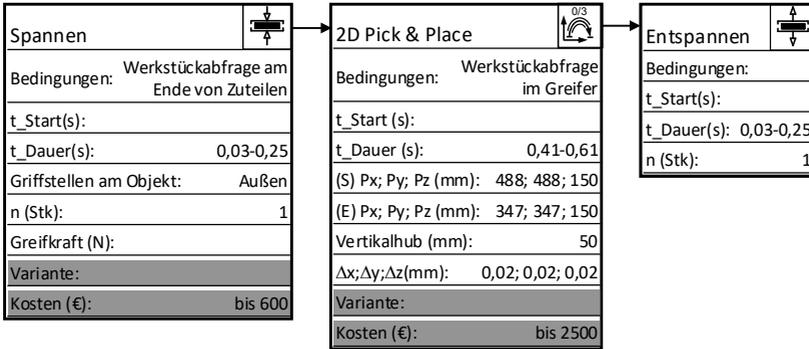


Abb. 6.10: Parameteridentifikation für das Spannen-Verschieben-Entspannen

Die Anlagenkomponenten Greifer, Vertikal- und Horizontalschlitten werden mit einander verbunden. Es gibt verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten, in diesem Beispiel wird die Verbindungsart wie in **Abb. 6.11** festgelegt.

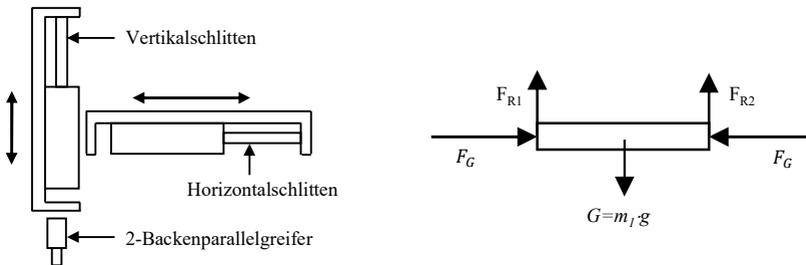


Abb. 6.11: Kombination Spannen-Verschieben und der Greifkraftbestimmung

Funktion Spannen

Der Chiphalter wird durch einen 2-Backen-Parallelgreifer mit der Greifkraft F_G gegriffen. Um einen Greifer auszuwählen, muss die Greifkraft ermittelt werden. Der Chiphalter wird an den Kanten wie **Abb. 6.11** gespannt. Damit der Chiphalter sicher gegriffen wird, muss die Reibungskraft F_R größer als

die Gewichtskraft sein. Ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von $S_f = 4$ garantiert die kraftschlüssige Verbindung [Hes11]. Es wird der Gewichtskraft folgendermaßen bestimmt:

$$G = m_1 \cdot g \quad (6.2)$$

wobei:

m_1 — Gewicht des Chiphalters

g — Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Die Reibungskraft umfasst zwei elementare Reibungskräfte:

$$F_{R1} = F_{R2} = \mu \cdot F_G \quad (6.3)$$

Aus den Gleichungen (6.2) und (6.3) wird die Greifkraft F_G ermittelt:

$$\mu \cdot F_G = \frac{G}{2} = \frac{m_1 \cdot g}{2} \rightarrow F_G = \frac{m_1 \cdot g}{2 \cdot \mu} \quad (6.4)$$

wobei: μ — Haftreibungskoeffizient, $\mu = 0,1$

Die Bewegung des 2-Backenparallelgreifers wird durch den Vertikalschlitten mit Hub von 50 mm bestimmt (s. Abb. 6.11). Dabei wird der Chiphalter vertikal mit einer max. Beschleunigung von $a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$ bewegt.

Aus der Gleichung (6.4) wird die Greifkraft bestimmt:

$$F_G = \frac{S_f \cdot m_1 \cdot (g + a_{max})}{2 \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 19,81}{2 \cdot 0,1 \cdot 1000} \approx 2 \text{ N}$$

Basierend auf der Greifkraft und der Konfiguration in Abb. 6.11 wird die Anforderungsliste erstellt und Varianten gesucht (s. Beispiel in **Tabelle 6.4**).

Tabelle 6.4: Anforderungsliste und Funktionsträger für Chiphalter-Greifen

Anforderungsliste	Funktionsträgervarianten			
	Vari- ante 1	Vari- ante 2	Vari- ante 3	Variante 4
	MPG 50	EGP 50- N-N-B	DHPS 16-A	MHQG2- 25
Greifkraft [N]: ab 2	175	215	105	63
Parallelgreifer	ja	ja	ja	ja
Griffstell am Objekt: Außen	ja	ja	ja	ja
Schließ-, Öffnungszeit [s]:	0,035	0,21	0,1	0,17
Hub pro Backe [mm]: bis 8	8	8	4	7
Masse [kg]: bis 0,5	0,35	0,51	0,18	0,625
Abstand zwischen Grund- backen [mm]: 30 bis 40	18-34	18-34	33-41	19-33
Kosten [€]: bis 600	550	600	400	350

Funktion vertikales Verschieben

Der Greifer mit einer Masse von circa 0,5 kg wird durch den Schlitten bewegt. Der Vertikalschlitten besitzt einem Hub von 50 mm und einer Verfahrszeit = 0,1 s. Die Antriebskraft wird durch Gleichung (6.5) berechnet:

$$F_A = (m_1 + m_2) \cdot \left(\frac{2 \cdot s}{t^2} + g \right) \cdot S_v \quad (6.5)$$

wobei:

m_1 — Gewicht des Chiphalters, $m_1 = 0,005 \text{ kg}$

m_2 — Gewicht des Greifers, $m_2 = 0,5 \text{ kg}$

s — Weg, $s = 0,05 \text{ m}$

S_v — Sicherheitsfaktor zum Auswahl der Linearmodule, $S_v = 2$

Mit der Gleichung (6.5) wird die Antriebskraft $F_A = 20 \text{ N}$ bestimmt. Nach dem Erstellen der Anforderungslisten werden die Funktionsträger aus den Katalogen ausgewählt (s. Beispiel **Tabelle 6.5**).

Tabelle 6.5: Anforderungsliste und Funktionsträger für das Vertikalverschieben

Anforderungsliste	Funktionsträgervarianten			
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
	LM 4 S060	LM 20/60	LM100 - H50	LSF25- 50
Nutzhub [mm]: 50	60	60	50	50
Antriebskraft [N]: ab 20	100	172	294	265
Verfahrzeit [s]:	0,2	0,18	0,15	0,12
Wiederholgenauigkeit [mm]: ± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01
Masse [kg]: bis 3 kg	0,8	1,55	2,6	1
Kosten [€]: bis 1100	480	500	640	750

Funktion horizontales Verschieben

Der Horizontalschlitten bewegt sich mit einem Hub = 200 mm und einer Verfahrzeit $t=0,21-0,33 \text{ s}$. Der Vertikalschlitten mit einer Masse circa 2 kg und der Greifer etwa 0,5 kg werden durch den Horizontalschlitten mitbewegt (s. Abb. 6.11). Die Antriebskraft wird durch Gl. (6.6) berechnet:

$$F_A = (m_1 + m_2 + m_3) \cdot \frac{2 \cdot s}{t^2} \cdot S_v \quad (6.6)$$

wobei: m_1 — Gewicht des Chiphalters, $m_1 = 0,005 \text{ kg}$

m_2 — Gewicht des Greifers, $m_2 = 0,5 \text{ kg}$

m_3 — Gewicht des Vertikalschlittens, $m_3 = 2 \text{ kg}$

s — Weg, $s = 0,2 \text{ m}$

S_v — Sicherheitsfaktor zum Auswahl der Linearmodule, $S_v = 2$

Mit der Gleichung (6.6) wird die Antriebskraft $F_A = 45 \text{ N}$ berechnet. Ausgehend von den Anforderungslisten werden die passenden Funktionsträger aus den Katalogen ermittelt und in **Tabelle 6.6** gezeigt.

Tabelle 6.6: Anforderungsliste und Funktionsträger für das Horizontalverschieben

Anforderungsliste	Funktionsträgervarianten			
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
	HMP-16-200	LM 20/200	LM100-H200	LSX25-200
Nutzhub [mm]: 200	200	200	200	200
Antriebskraft [N]: ab 45	121	172	294	265
Verfahrzeit [s]:	0,38	0,37	0,33	0,3
Wiederholgenauigkeit [mm]: ± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01
Kosten [€]: bis 1400	800	850	950	1000

6.3.3 Funktion Schwenken

Der Chiphalter wird durch die Werkstückaufnahme gehalten und zur Station 2 transportiert. Die wichtigen Parameter des Handhabungsablaufs werden in die parametrischen Symbole eingegeben und in **Abb. 6.12** beschrieben.

Der Rundscharntisch gehört zu den Drehmodulen. Die Drehzeit, Drehwinkel sowie die Massenträgheit hängen voneinander ab. In diesem Beispiel dreht sich der Rundscharntisch im Uhrzeigersinn um 45° .

Halten		Schwenken	
Haltestellen am Objekt:	Außen	Bedingungen:	
Variante:	Werkstückaufnahme auf dem Rundschalttisch	t_Start (s):	
		t_Dauer (s):	0,32-1,29
		(S) Px; Py; Pz (mm):	347; 347; 150
		(E) Px; Py; Pz (mm):	491; 0; 150
		Rotation (°):	R(w-Achse, -45°)
		Δx; Δy; Δz (mm):	0,2; 0,2; 0
		Variante:	
		Kosten (€):	bis 7000

Abb. 6.12: Parameteridentifikation für Chiphalter Schwenken

Zur Bestimmung der Drehzeit muss die Massenträgheit berechnet werden. Die Form des Aufbautellers wird in **Abb. 6.13** gezeigt.

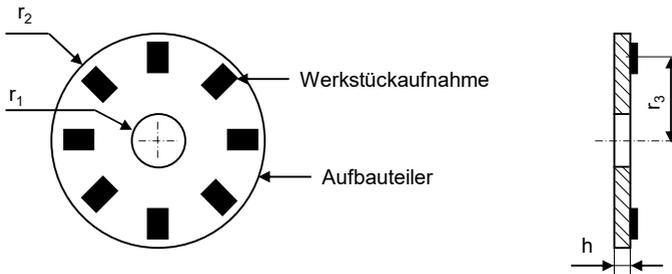


Abb. 6.13: Aufbauteller des Rundschalttisches

Der Aufbauteller ist eine Scheibe mit dem Durchmesser von 1000 mm und Dicke von 10 mm. Der Massenträgheitsmoment wird durch Gl. (6.7) bestimmt [Bra14]:

$$J_t = \frac{1}{2} m_t \cdot (r_1^2 + r_2^2) + 8 \cdot m_w \cdot r_3^2 \quad (6.7)$$

wobei:

r_1 und r_2 — Innen- und Außenradius der Rundscheibe, $r_1 = 0,05 \text{ m}$, $r_2 = 0,5 \text{ m}$

m_w — Masse der Werkstückaufnahme, $m_w = 0,65 \text{ kg}$

r_3 — Radius der eingebauten Werkstückaufnahme, $r_3 = 0,45 \text{ m}$

$m_t(\text{kg})$ — Massen der Scheibe und wird durch Gl. (6.8) bestimmt:

$$m_t = \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot h \cdot \rho \quad (6.8)$$

wobei:

ρ — Dichte des Stahls, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

h — Höhe der Scheibe, $h = 0,01 \text{ m}$

Mit Gl. (6.8) und Gl. (6.7) werden die Masse der Scheibe $m_t = 61 \text{ kg}$ und das Massenträgheitsmoment $J_t = 8,75 \text{ (kgm}^2\text{)}$ berechnet. Basierend auf den Parametern der Funktionsfolge und dem Massenträgheitsmoment wird die Anforderungsliste des Rundschalttischs erstellt (s. Beispiel in **Tabelle 6.7**).

Tabelle 6.7: Anforderungsliste und Rundschalttischvarianten

Anforderungsliste	Funktionsträgervarianten			
	<i>Variante 1</i>	<i>Variante 2</i>	<i>Variante 3</i>	<i>Variante 4</i>
	RT160	RT200	TC220	TC320
Aufbauplattengröße [mm]: 1100	1300	1800	1100	1400
Drehwinkel [°]: 45	45	45	45	45
Schrittzeit [s]:	0,48	0,32	0,54	0,36
Massenträgheitsmoment [kgm ²]: 8,75	9,5	9,1	9,63	12,4
Steuerung der Rastzeit	ja	ja	ja	ja
Kosten [€]: bis 7000	5500	7500	4500	7000

6.4 Auswahl der Funktionsträgervarianten

6.4.1 Erstellung der Weg-Schritt-Diagramme

Für die Minimierung der Taktzeit des Rundtaktautomaten und Minimierung der Gesamtanschaffungskosten des Montagesystems müssen alle Datenbanken der Anlagenkomponenten vorgegeben sowie die Entscheidungsvariablen, Zielfunktion und Nebenbedingungen definiert werden. Die Voraussetzung für die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems ist der Handhabungsablauf der Anlage. In diesem Beispiel enthält der Rundtaktautomat fünf Stationen, deshalb müssen fünf Weg-Schritt-Diagramme erstellt werden. Der Zyklus beginnt mit der Übergabe eines bereits im Greifer befindlichen Chiphalters an die Werkstückaufnahme auf dem Rundschalttisch.

Station 1: Chiphalter Übergabe

Das Weg-Schritt-Diagramm der Station 1 umfasst neun Schritte und wird in **Abb. 6.14** beschrieben.

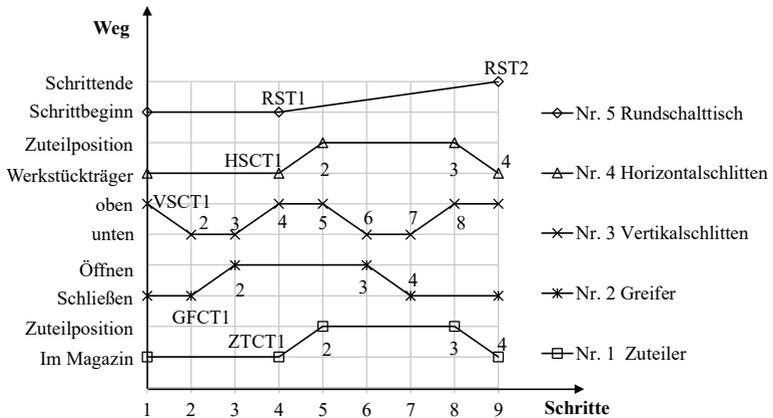


Abb. 6.14: Weg-Schritt-Diagramm der Station 1

wobei:

ZTCT1 bis ZTCT4 — Änderungspunkte Chiphalter zuteilen

GFCT1 bis GFCT4 — Änderungspunkte Chiphalter spannen / entspannen

VSCT1 bis VSCT8 — Änderungspunkte Chiphalter Vertikalverschieben

HSCT1 bis HSCT4 — Änderungspunkte Chiphalter Horizontalverschieben

RST1, RST2 — Änderungspunkte des Rundschalttisches

Am Anfang eines Zyklus sind die Zustände der Funktionsträger wie folgt:

Zuteiler Nr.1: im Magazin, um einen Chiphalter zu holen

Greifer Nr. 2: geschlossen

Vertikalschlitten Nr. 3: in oberer Position

Horizontalschlitten Nr. 4: in eingefahrener Position (Richtung Werkstückträger)

Rundschalttisch Nr. 5: in Rast

Die Arbeitsabläufe der Station 1 wird wie folgt beschrieben:

- Schritt 1: Während der Horizontalschlitten Nr. 4 in eingefahrener Position verweilt, fährt der Vertikalschlitten Nr. 3 mit einem gegriffenen Chiphalter nach unten.
- Schritt 2: Der Vertikalschlitten Nr. 3 ist in der Endlage angekommen und der Greifer Nr. 2 öffnet. Der Chiphalter wird dabei in der Werkstückaufnahme abgelegt.
- Schritt 3: Der Greifer Nr. 2 ist geöffnet, der Vertikalschlitten Nr. 3 bewegt sich nach oben.
- Schritt 4: Kommt der Vertikalschlitten Nr. 3 in seiner Endlage an, fährt der Horizontalschlitten Nr. 4 aus. Der Rundschalttisch Nr. 5 dreht im Uhrzeigersinn um 45° und der Zuteiler Nr. 1 fährt mit einem, vom Magazin separierten Chiphalter, aus.

- Schritt 5: Sind der Horizontalschlitten Nr.4 und der Zuteiler Nr. 1 in ihren Endlagen angekommen, verfährt der Vertikalschlitten Nr. 3 nach unten.
- Schritt 6: Ist der Vertikalschlitten Nr. 3 in seiner Endlage angekommen, schließt der Greifer Nr. 2.
- Schritt 7: Ist der Greifer Nr. 2 geschlossen, verfährt der Vertikalschlitten Nr. 3 mit einem Chiphalter nach oben.
- Schritt 8: Kommt der Vertikalschlitten Nr. 3 in seiner Endlage an, fahren der Horizontalschlitten Nr. 4 zurück und der Zuteiler Nr. 1 zurück, um erneut einen Chiphalter aus dem Magazin zu holen.
- Schritt 9: Der Horizontalschlitten Nr. 4 und der Zuteiler Nr. 1 kommen in ihren Endlagen. Ein neuer Zyklus kann beginnen, sobald der Rundscharfisch Nr. 5 sowie der Horizontalschlitten Nr. 4 ebenfalls ihre Endlagen erreicht haben.

Station 2: Einsetzhandling für Chip

Das Weg-Schritt-Diagramm der Station 2 umfasst 8 Schritte und wird in **Abb. 6.15** beschrieben.

wobei:

VNCT1 bis VNCT4 — Änderungspunkte Chiphalter Vertikalschlitten spannen / entspannen

ZTCH1 bis ZTCH4 — Änderungspunkte Chip zuteilen

GFCH1 bis GFCH4 — Änderungspunkte Chip spannen / entspannen

VSCH1 bis VSCH4 — Änderungspunkte Chip Vertikalverschieben

HSCH1 bis HSCH4 — Änderungspunkte Chip Horizontalverschieben

Am Anfang eines Zyklus sind die Zustände der Funktionsträger wie folgt:

Rundschalttisch Nr. 5: in Rast

Chiphalter spannen Nr. 6: in oberer Position

Zuteiler Nr. 9: in Zuteilposition, um einen Chip bereitzustellen

Greifer Nr. 10: geschlossen, um einen Chip zu halten

Vertikalschlitten Nr. 11: in unterer Position, um einen Chip zu holen

Horizontalschlitten Nr. 12: in ausgefahrener Position (Richtung Zuteilposition)

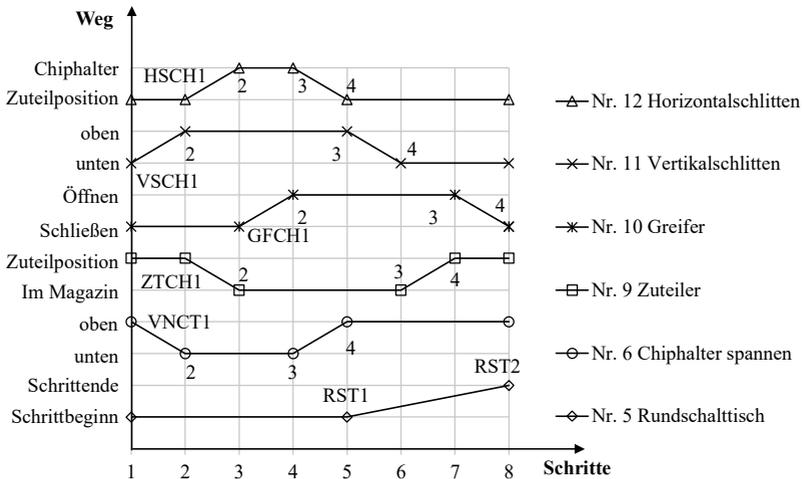


Abb. 6.15: Weg-Schritt-Diagramm der Station 2

Die Arbeitsabläufe der Station 2 wird beschrieben, wie folgt:

- Schritt 1: der Schlitten Nr. 6 fährt aus, um den Chiphalter auf der Werkstückaufnahme zu spannen. Der Vertikalschlitten Nr. 11 fährt, mit einem bereits gefassten Chip nach oben.
- Schritt 2: Sind der Schritten Nr. 6 und der Vertikalschlitten Nr. 11 in ihren Endlagen angekommen, fährt der Horizontalschlitten Nr. 12

aus, um einen Chip in den Chiphalter einzufügen. Der Zuteiler Nr. 9 fährt zurück, um einen weiteren Chip aus dem Linearschwingförderer zu aufzunehmen.

- Schritt 3: Ist der Horizontalschlitten Nr. 12 in seiner Endlage angekommen, öffnet der Greifer Nr. 10. Der Zuteiler Nr. 9 ist in seiner Endlage angekommen.
- Schritt 4: Ist der Greifer Nr. 10 geöffnet, fährt der Schlitten Nr. 6 ein, um den Chiphalter zu entspannen und der Horizontalschlitten Nr. 12 fährt zurück.
- Schritt 5: Ist der Chiphalter entspannt, dreht der Rundschtaltisch Nr. 5 im Uhrzeigersinn um 45° . Der Vertikalschlitten Nr. 11 fährt aus.
- Schritt 6: Ist der Vertikalschlitten Nr. 11 in seiner Endlage angekommen, fährt der Zuteiler Nr. 9 mit einem Chip aus, um einen neuen Chip bereitzustellen.
- Schritt 7: Ist der Zuteiler Nr. 9 in seiner Endlage angekommen, schließt der Greifer Nr. 10.
- Schritt 8: Ein neuer Zyklus kann beginnen, sobald der Rundschtaltisch Nr. 5 die Schrittbewegung beendet hat und der Greifer Nr. 10 geschlossen ist.

Station 3: Einsetzhandling für Buchse

Das Weg-Schritt-Diagramm der Station 3 wird in **Abb. 6.16** beschrieben. Der Ablauf der Funktionsträger ist ähnlich wie bei Station 1.

wobei:

ZTBU1 bis ZTBU4 — Änderungspunkte Buchse zuteilen

GFBU1 bis GFBU4 — Änderungspunkte Buchse spannen / entspannen

AWBG1 bis AWBG 3: Änderungspunkte Vertikalschlitten um Anwesenheit des Chips in dem Chiphalter zu prüfen

Am Anfang eines Zyklus sind die Zustände der Funktionsträger wie folgt:

Rundschalttisch Nr. 5: in Rast

Vertikalschlitten Nr. 19: in oberer Position

Die Arbeitsabläufe der Station 4 wird beschrieben, wie folgt:

- Schritt 1: Die der Vertikalschlitten (Kontrollvorrichtung) Nr. 19 fährt nach unten.
- Schritt 2: Kommt der Vertikalschlitten in seiner Endlage an, dann fährt er zurück
- Schritt 3. Ist der Vertikalschlitten in seiner Endlage angekommen, dreht der Rundschalttisch Nr. 5 im Uhrzeigersinn um 45°.
- Schritt 4: Kommt der Rundschalttisch in die Rastphase an, kann ein neuer Zyklus anfangen.

Station 5: Auswurfstation

Das Weg-Schritt-Diagramm der Station 5 umfasst 7 Schritte und wird in **Abb. 6.18** beschrieben.

wobei:

GFBG1 bis GFBG4 — Änderungspunkte Baugruppe spannen / entspannen

VSBG1 bis VSBG4 — Änderungspunkte Baugruppe Vertikalverschieben

HSBG1 bis HSBG4 — Änderungspunkte Baugruppe Horizontalverschieben

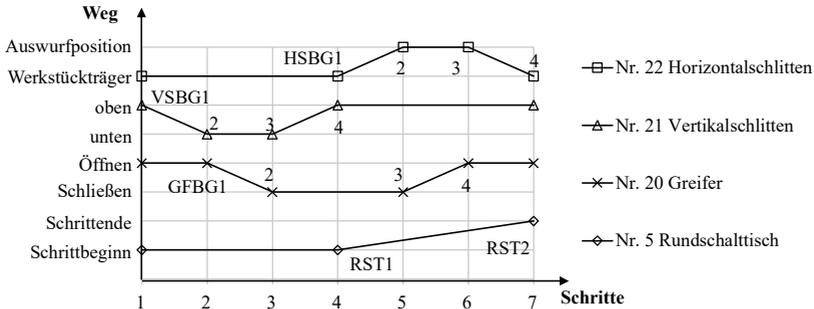


Abb. 6.18: Weg-Schritt-Diagramm der Station 5

Am Anfang eines Zyklus sind die Zustände der Funktionsträger wie folgt:

Rundschalttisch Nr. 5: in Rast

Greifer Nr. 20: geöffnet

Vertikalschlitten Nr.21: in oberer Position

Horizontalschlitten Nr. 22: in Richtung des Werkstückträgers

Die Arbeitsabläufe der Station 5 wird beschrieben, wie folgt:

- Schritt 1: Der Vertikalschlitten Nr. 21 fährt nach unten, um die montierte Baugruppe zu spannen.
- Schritt 2: Ist der Vertikalschlitten Nr. 21 in seiner Endlage angekommen, schließt der Greifer Nr. 20.
- Schritt 3: Ist der Greifer Nr. 20 geschlossen, fährt der Vertikalschlitten Nr. 21 ein, um eine montierten Baugruppe nach oben zu bringen.
- Schritt 4: Ist der Vertikalschlitten Nr. 21 in seiner Endlage angekommen, fährt der Horizontalschlitten Nr. 22 aus und der Rundschalttisch Nr. 5 dreht im Uhrzeigersinn um 45°.

- Schritt 5: Kommt der Horizontalschlitten Nr. 22 in die Entnahmelage an, öffnet der Greifer Nr. 20.
- Schritt 6: Ist der Greifer Nr. 20 geöffnet, fährt der Horizontalschlitten Nr. 22 zurück.
- Schritt 7: Kommt der Horizontalschlitten Nr. 22 in seiner Endlage an und vollendet der Rundschalttisch Nr. 5 seine Schrittbewegung, kann ein neuer Zyklus beginnen.

6.4.2 Standardform des Optimierungsproblems

Stufe 1: Minimierung der Taktzeit

Zielfunktion

Der Rundtaktautomat enthält 5 Stationen: $\mathbb{S} = \{1,2,3,4,5\}$. Die Mengen der Funktionsträger des Rundtaktautomaten von Station 1 bis Station 5 sind:

$$\mathbb{F}_1 = \{\mathbf{RST}, \quad \mathbf{ZTCT}, \quad \mathbf{HSCT}, \quad \mathbf{VSCT}, \quad \mathbf{GFCT}\}$$

$$\mathbb{F}_2 = \{\mathbf{RST}, \quad \mathbf{ZTCH}, \quad \mathbf{HSCH}, \quad \mathbf{VSCH}, \quad \mathbf{GFCH}, \\ \mathbf{VNCT}\}$$

$$\mathbb{F}_3 = \{\mathbf{RST}, \quad \mathbf{ZUBU}, \quad \mathbf{HSBU}, \quad \mathbf{VSBU}, \quad \mathbf{GFBU}\}$$

$$\mathbb{F}_4 = \{\mathbf{RST}, \quad \mathbf{AWBG}\}$$

$$\mathbb{F}_5 = \{\mathbf{RST}, \quad \mathbf{HSBG}, \quad \mathbf{VSBG}, \quad \mathbf{GFBG}\}$$

Zur Reduzierung der Taktzeit müssen alle Ausführzeiten der Funktionsträger in Abb. 6.14 bis Abb. 6.18 so gering wie möglich gehalten werden. Die Zeitpunkte eines Funktionsträgers (Startzeit und Endzeit) im Weg-Schritt-Diagramm hängen zumeist von anderen Funktionsträgern ab. Der Funktionsträger in der Station mit der längsten Ausführzeit entscheidet über die Taktzeit der Station. Wenn die größte Ausführzeit minimiert wird, wird die Taktzeit der Station minimiert. In den Abb. 6.14 bis Abb. 6.18 sind die folgenden Zeitpunkte die Endzeitpunkte der Zyklen:

$t_{\text{HSCT},4}^1 ; t_{\text{ZTCT},4}^1 ; t_{\text{RST},2}^1$: Zeitpunkte der Funktionsträger **HSCT**, **ZTCT** und **RST** im Schritt 9 der Station 1 (Abb. 6.14)

$t_{\text{GFCH},4}^2 ; t_{\text{RST},2}^2$: Zeitpunkte der Funktionsträger **GFCH**, und **RST** im Schritt 8 der Station 2 (Abb. 6.15)

$t_{\text{HSBU},4}^3 ; t_{\text{ZTBU},4}^3 ; t_{\text{RST},2}^3$: Zeitpunkte der Funktionsträger **HSBU**, **ZTBU** und **RST** im Schritt 9 der Station 3 (Abb. 6.16)

$t_{\text{RST},2}^4$: Zeitpunkte des Funktionsträgers **RST** im Schritt 4 der Station 4 (Abb. 6.17)

$t_{\text{HSBG},4}^5 ; t_{\text{RST},2}^5$: Zeitpunkte der Funktionsträger **HSBG** und **RST** im Schritt 7 der Station 5 (Abb. 6.18)

Zur Minimierung der Gesamttaktzeit wird die **Zielfunktion** definiert:

$$\min T \quad (6.9)$$

unter den **Nebenbedingungen**

Da $T = \max \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$ ist (d.h. der höchste Wert der Menge $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$), muss die folgende Nebenbedingung gelten:

$$T \geq T_\sigma, \quad \forall \sigma \in \{1,2,3,4,5\} \quad (6.10)$$

Da die Taktzeiten aller Stationen den jeweiligen Endzeitpunkte entsprechen, d.h.

$$\begin{aligned}
T_1 &= \max \left\{ t_{\text{HSCT}, 4}^1, t_{\text{ZTCT}, 4}^1, t_{\text{RST}, 2}^1 \right\} \\
T_2 &= \max \left\{ t_{\text{GFCH}, 4}^2, t_{\text{RST}, 2}^1 \right\} \\
T_3 &= \max \left\{ t_{\text{HSBU}, 4}^3, t_{\text{ZTBU}, 4}^3, t_{\text{RST}, 2}^1 \right\} \\
T_4 &= \max \left\{ t_{\text{RST}, 2}^1 \right\} \\
T_5 &= \max \left\{ t_{\text{HSBG}, 4}^5, t_{\text{RST}, 2}^1 \right\}
\end{aligned} \tag{6.11}$$

müssen die folgenden Nebenbedingungen gelten:

$$\begin{aligned}
T_1 &\geq t_{\text{HSCT}, 4}^1, & T_1 &\geq t_{\text{ZTCT}, 4}^1, & T_1 &\geq t_{\text{RST}, 2}^1 \\
T_2 &\geq t_{\text{GFCH}, 4}^2, & T_2 &\geq t_{\text{RST}, 2}^1 \\
T_3 &\geq t_{\text{HSBU}, 4}^3, & T_3 &\geq t_{\text{ZTBU}, 4}^3, & T_3 &\geq t_{\text{RST}, 2}^1 \\
T_4 &\geq t_{\text{RST}, 2}^1 \\
T_5 &\geq t_{\text{HSBG}, 4}^5, & T_5 &\geq t_{\text{RST}, 2}^1
\end{aligned} \tag{6.12}$$

Die Ablaufbedingungen für die Station 1 bis 5 müssen anhand der Zeitpunkte festgelegt werden. Diese Bedingungen zwischen den Zeitpunkten der Funktionsträger sind ähnlich. Deshalb werden die Nebenbedingungen für Schritt 1, 2 und 3 in der **Station 1** als ein Beispiel gezeigt.

Schritt 1

- In Schritt 1 beginnt der Funktionsträger VSCT. Somit wird die Startzeit einen Wert von 0 zugewiesen:

$$t_{\text{VSCT}, 1}^1 = 0 \tag{6.13}$$

Schritt 2

- Die Bewegung von dem Zeitpunkt $t_{\text{VSCT},1}^1$ bis zu dem Zeitpunkt $t_{\text{VSCT},2}^1$ stellt einen vertikalen Vorschubprozess des **VSCT** in Station 1 dar:

$$t_{\text{VSCT},2}^1 - t_{\text{VSCT},1}^1 \geq \sum_{v \in \Gamma_{\text{VSCT}}} \tau_v^{\text{HINUNTER}} \cdot \lambda_{\text{VSCT},v}^1 \quad (6.14)$$

wobei:

τ_v^{HINUNTER} — Nennausführungszeit für die vertikale Bewegung einer FTV v des Funktionsträgers **VSCT**

$\lambda_{\text{VSCT},v}^1$ — binäre Variable einer FTV v

Γ_{VSCT} — Menge der FTV v des Funktionsträgers **VSCT**

Es ist zu beachten, dass die Zeitpunktvariablen $t_{\text{VSCT},1}^1$ und $t_{\text{VSCT},2}^1$ in diesem Fall auch $t_{\text{VSCT,HINUNTER}_{\text{START}}}^1$ bzw. $t_{\text{VSCT,HINUNTER}_{\text{ENDE}}}^1$ genannt werden können, aber aus Gründen der Kürze wird diese Nomenklatur (d.h. p_{START} und $p_{\text{ENDE}} \forall p \in \mathbb{P}_k^\sigma$, wobei p der Prozessname ist) nicht übernommen.

Da für einen bestimmten Funktionsträger einer Station nur eine FTV ausgewählt werden darf, gilt auch die folgende Nebenbedingung:

$$\sum_{v \in \Gamma_{\text{VSCT}}} \lambda_{\text{VSCT},v}^1 = 1 \quad (6.15)$$

- Der Öffnungszeitpunkt des **GFCT** $t_{\text{GFCT},1}^1$ wird von dem Zeitpunkt $t_{\text{VSCT},2}^1$ entschieden:

$$t_{\text{GFCT},1}^1 \geq t_{\text{VSCT},2}^1 \quad (6.16)$$

Schritt 3

- Der Endzeitpunkt des **GFCT** $t_{\text{GFCT},2}^1$ ist abhängig von der ausgewählten FTV aus der entsprechenden FTL:

$$t_{\text{GFCT},2}^1 - t_{\text{GFCT},1}^1 \geq \sum_{v \in \Gamma_{\text{GFCT}}} \tau_v^{\text{ÖFF}} \cdot \lambda_{\text{GFCT},v}^1 \quad (6.17)$$

wobei:

$\tau_v^{\text{ÖFF}}$ — Nennausführungszeit für das Öffnen einer FTV des Funktionsträgers **GFCT**

$$\sum_{v \in \Gamma_{\text{GFCT}}} \lambda_{\text{GFCT},v}^1 = 1 \text{ — nur eine FTV ausgewählt}$$

- Der Startbewegungszeitpunkt des **VSCT** $t_{\text{VSCT},3}^1$ wird von dem Zeitpunkt $t_{\text{GFCT},2}^1$ entschieden:

$$t_{\text{VSCT},3}^1 \geq t_{\text{GFCT},2}^1 \quad (6.18)$$

Ähnlich wie Schritt 2, 3 werden die Bedingungen für die Schritte 4, 5, 6, 7, 8 und 9 bestimmt.

Stufe 2: minimale Gesamtanschaffungskosten gemäß der Bedingtaktzeit

Zielfunktion

Die minimalen Gesamtkosten des Rundtaktautomaten werden durch die Zielfunktion definiert:

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{\sigma \in \mathbb{S}} \sum_{\kappa \in \mathbb{F}_\sigma} \sum_{v \in \Gamma_\kappa} c_v \cdot \lambda_{\kappa,v}^\sigma \\
& = \min \left(\sum_{v \in \Gamma_{\text{VSCT}}} c_v \cdot \lambda_{\text{VSCT},v}^1 + \dots + \sum_{v \in \Gamma_{\text{HSBG}}} c_v \cdot \lambda_{\text{HSBG},v}^5 \right) \quad (6.19)
\end{aligned}$$

unter den **Nebenbedingungen**

- die Beziehungen zwischen den Zeitpunkten der Funktionsträger in Stufe 1
- neue Taktzeiten der Stationen sind kleiner oder gleich T^* von Stufe 1

$$T \leq T^* \quad (6.20)$$

6.4.3 Gestaltung des Programms in CPLEX und Ergebnisse

Gestaltung des Programms

Zur Lösung des Optimierungsproblems wird die Optimierungssprache CPLEX OPL in dieser Arbeit verwendet. Alle FTL sowie deren FTV werden einer Datenbank hinterlegt. Ein OPL Modell liest die Eingangsparameter aus der Datenbank und schreibt die Ergebnisse in die Datenbank.

Ein OPL-Projekt besteht aus beiden Stufen (s. **Abb. 6.19**). Jede Stufe enthält ein **".mod file"** und ein **".dat file"**. Das **".mod file"** erhält die Eingangsparameter, Variablen und die Zielfunktion. Das **".dat file"** initialisiert die Daten, die in der Datenbank deklariert wurden. Die Datenbank 1 ist eine Sammlung externer Daten und umfasst alle Mengen der Funktionsträger mit FTV sowie die Ergebnisse der Stufe 1. Die Gliederung der Stufe 2 ist genauso wie die

Gliederung der Stufe 1. Die Taktzeit in der Stufe 1 ist eine Bedingung für die Stufe 2. Die Ergebnisse des Optimierungsprogramms werden in der Datenbank 2 gespeichert.

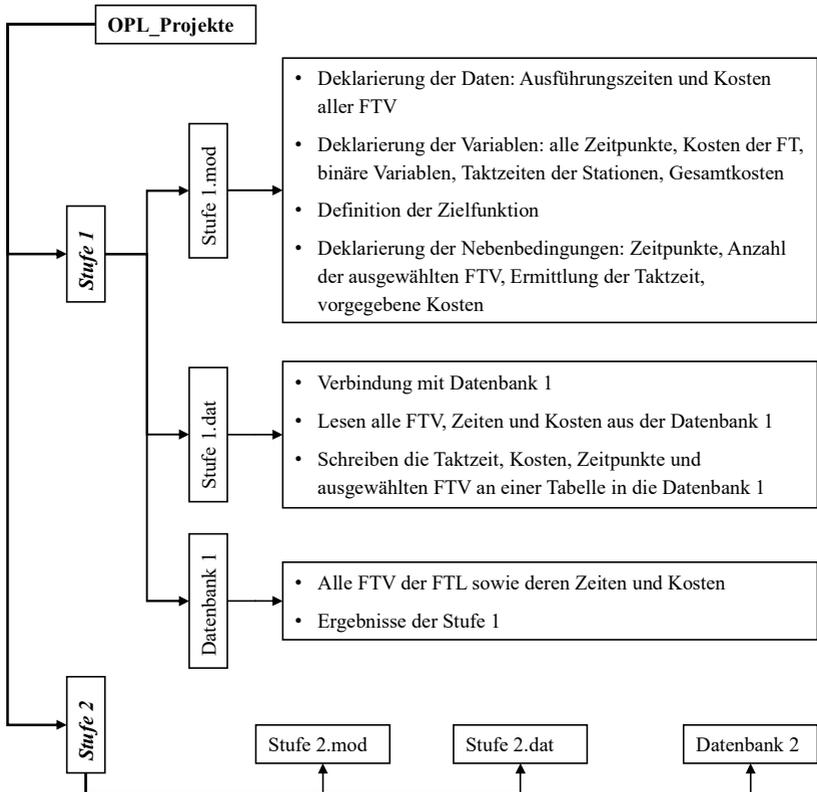


Abb. 6.19: Gliederung des Optimierungsprogramms

Ergebnisse

Durch die Verwendung der Datenbanken aus Anhang 9.6 und der Programmierung mit CPLEX wird das Optimierungsproblem gelöst. Zum Vergleich

und zur Auswahl einer Taktzeit oder der Gesamtkosten werden diese Parameter und alle ausgewählten FTV in einer Reihe ausgegeben. **Abb. 6.20** zeigt die Ergebnisse nach der Stufe 1 und Stufe 2.

Taktzeit und Gesamtkosten							ausgewählten FTV		
Taktzeit	Sum_Kosten	T1	T2	T3	T4	T5	RST	ZTCT	
0,89	34160	0,89	0,84	0,82	0,76	0,76	RT200	ELM 37--H260	EL
1,01	23990	1,01	0,99	0,98	0,94	0,94	HTT-80-8-240	LM 200--H200	KLN
1,09	19840	1,09	1,07	1,07	1,07	1,08	HTT-80-8-300	LM 200--H200	KLN

Ergebnisse nach Stufe 1

Taktzeit und Gesamtkosten							ausgewählten FTV		
Taktzeit	Sum_Kosten	T1	T2	T3	T4	T5	RST	ZTCT	
0,89	30370	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	HTT-80-8-240	ELM 37--H260	EL
1,01	22440	1,01	1,01	1,005	1,005	1,01	HTT-80-8-270	LM 200--H200	KLN
1,09	19590	1,09	1,09	1,08	1,075	1,08	HTT-80-8-300	LM 200--H200	KLN

Ergebnisse nach Stufe 2

Abb. 6.20: Unterschiedliche Ergebnisse zwischen der Stufe 1 und Stufe 2

- In Stufe 1 wird der Startwert der vorgegebenen Gesamtkosten am Anfang nicht eingeschränkt, jedoch später in jeder Iteration des Programms. Die Taktzeit $T = 0,89$ s ist die kleinste Taktzeit. Die Taktzeiten $T = 1,01$ s und $1,09$ s werden durch die Bedingung der Gesamtkosten $C_{\text{GESAMT}}^* = 24.000$ € und $C_{\text{GESAMT}}^* = 20.000$ € ermittelt.
- Im Vergleich mit der Stufe 1 wird die Taktzeit in der Stufe 2 nicht verändert und die Gesamtkosten reduziert sowie die ausgewählten FTV gewechselt. Anhand der Ergebnisse nach der Stufe 2 lassen sich die besten FTV gemäß der minimalen Taktzeit oder Gesamtkosten bestimmen.

Die Ergebnisse nach Stufe 1 und 2 in Abb. 6.20 stellen nur die Liste der ausgewählten FTV dar. Um die Zeitpunkte jedes Funktionsträgers im Weg-Schritt-Diagramm zu kontrollieren, werden die ausgewählten FTV, Zeitpunkte sowie Kosten in die anderen Tabellen in der Datenbank 2 geschrieben.

Basierend auf den Zeitpunkten der ausgewählten FTV lassen sich die Zeit-Schritt-Diagramme erstellen.

Die Unterschiede zwischen den ausgewählten Varianten in Stufe 1 und 2 sind die Verfahrenszeiten und Anschaffungskosten. Diese Unterschiede werden durch die Weg-Zeit-Diagramme in **Abb. 6.21** am Beispiel für die **Station 1** angedeutet.

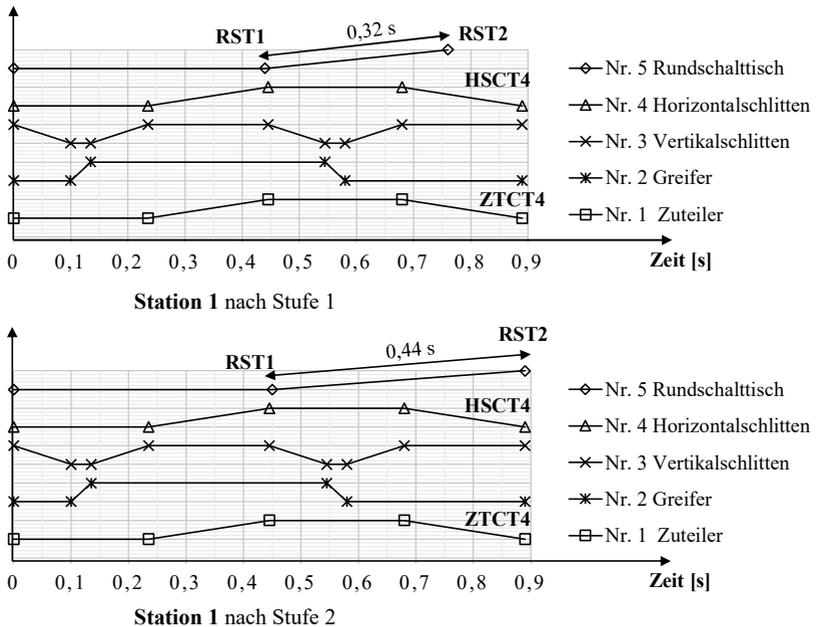


Abb. 6.21: Weg-Zeit-Diagramm entsprechend der Stufe 1 und Stufe 2

Die Taktzeit der Station 1 wurden durch die Endzeitpunkte der Rundschalttisch Nr. 5, Horizontalschlitten Nr. 4 und Zuteiler Nr. 1 entschieden. In Stufe 1 sind diese Zeitpunkte $t_{\text{RST},2}^1 = 0,76 \text{ s}$, $t_{\text{HSCT},4}^1 = 0,89 \text{ s}$ und $t_{\text{ZTCT},4}^1 = 0,89 \text{ s}$. Das bedeutet, in Stufe 2 können die anderen Varianten des Rundschalttisches mit den größeren Schrittzzeiten und günstigeren Kosten ausge-

wählt werden. Im Vergleich mit Stufe 1 hat die Schrittzeit des Rundschalttisches einen Wert von 0,44 s anstatt eines Wert von 0,32 s. Die Endzeitpunkt des Rundschalttisches ist $t_{RST,2}^1 = 0,89 s$ und überschreitet die Taktzeit $T^* = 0,89 s$ nicht.

Die Taktzeiten und Gesamtanschaffungskosten von der Station 1 bis 5 nach Stufe 1 und 2 werden durch die Balkendiagramme in **Abb. 6.22** dargestellt.

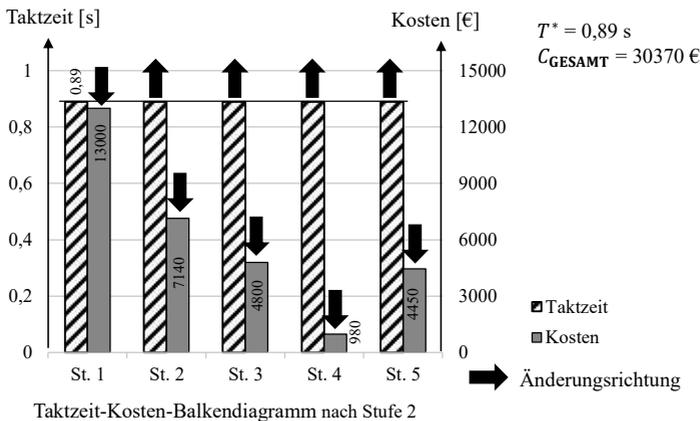
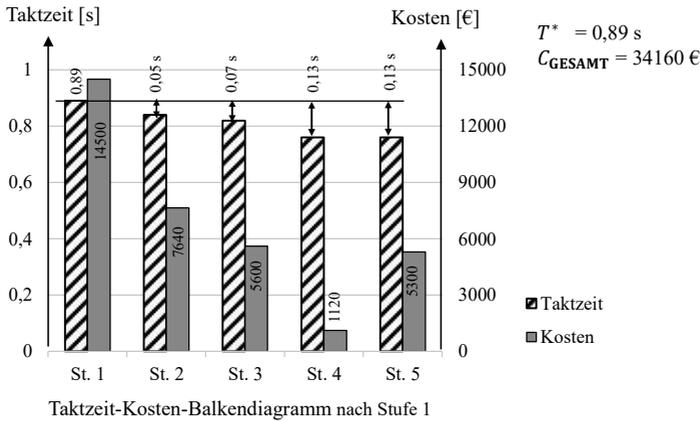


Abb. 6.22: Taktzeit - Kosten des Rundtaktautomaten

In Stufe 1 ist die Taktzeit der Station 1 am längsten. Die Zeitunterschiede zwischen der Station 1 mit den Stationen 2, 3, 4 und 5 sind von 0,05 s bis 0,13 s. Die Taktzeitabweichungen zwischen den Stationen wurden durch Stufe 2 ausgeglichen. Die Taktzeit des Rundtaktautomaten T wird durch die Endzeit des Rundschalttisches $t_{\text{RST},2}^1 = 0,89$ s bestimmt.

In Stufe 2 wurden alle FTV untersucht und die neuen Taktzeiten der Stationen 1 bis 5 berechnet, um die Kosten jeder FTV sowie Gesamtkosten zu verringern. In Station 1 (s. Abb. 6.22) wurden die günstigeren FTV gefunden und die Taktzeit $T_1 = T^* = 0,89$ s nicht verlängert.

In Stationen 2 bis 5 wurden die Kosten gesenkt und die neuen Taktzeiten T_2, T_3, T_4, T_5 erhöht. Die Änderungsrichtung in Stufe 2 bedeutet, dass das Optimierungsprogramm die geeignetsten FTV für alle Stationen bestimmt hat, um die minimale Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten zu erreichen. Die Gesamtanschaffungskosten wurde um 3790 € auf 34160 € gesenkt. Die Kosten der Station 1 sind inklusive der Kosten des Rundschalttisches.

Die Bewegungsabläufe der Station 1 bis 5 in **Abb. 6.23** sind ähnlich in wie Abb. 6.14 bis Abb. 6.18. Das bedeutet, die ausgewählten FTV und berechneten Zeitpunkte, welche das Optimierungsprogramm ermittelt hat, sind richtig.

Die Gesamttaktzeit des Rundtaktautomaten hängt nicht nur von Funktionsträgern jeder Station, sondern auch vom Rundtakttisch ab. Der Rundschalttisch transportiert gleichzeitig die Chiphalter von einer Station zur nächsten. Wenn die Handhabungsfunktionen in einer Station fertig aber in einer anderen Station noch nicht beendet sind, darf der Rundschalttisch noch nicht drehen. Z. B. in die Station 4 (Abb. 6.23) fährt der Vertikalschlitten Nr. 19 im Zeitpunkt $t_{\text{AWBG},3}^4 = 0,42$ s zurück. Im Prinzip kann danach der Rundschalttisch Nr. 5 sofort mit der Schrittphase beginnen, jedoch geschieht dies erst zum Zeitpunkt $t_{\text{RST},1}^4 = 0,45$ s.

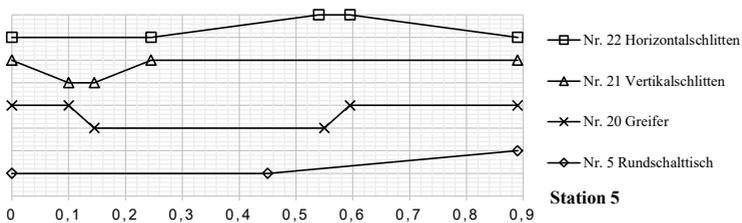
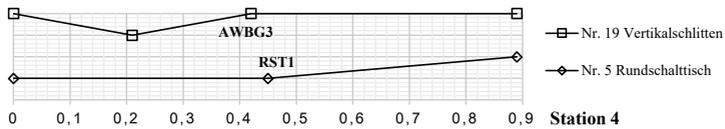
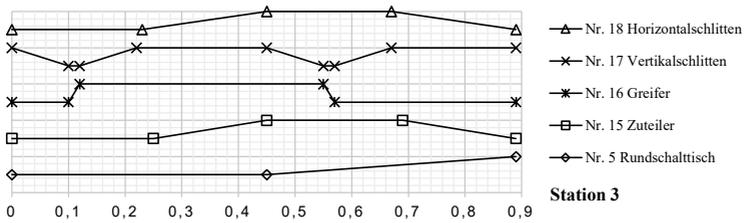
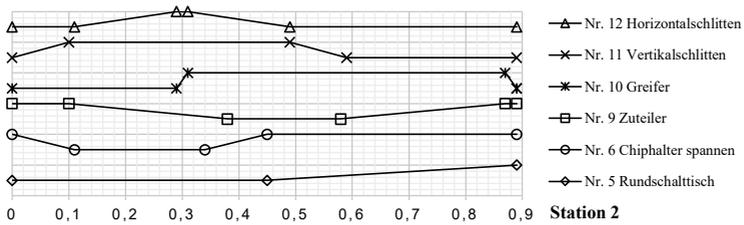
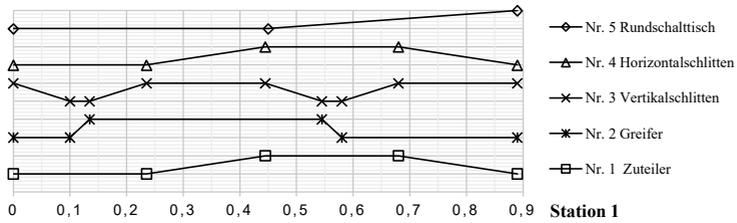


Abb. 6.23: Zeit-Schritt-Diagramm mit der Taktzeit $T = 0,89$ s

6.5 Konstruktive Umsetzung

Der Rundtaktautomat umfasst fünf Stationen. Basierend auf den Aufgaben der Montage und Handhabung werden die Werkstückflüsse im Raum mit Hilfe des Ortswechselplans angeordnet. Bestandteile des Rundtaktautomaten sind zwei Vibrationswendelförderer für Chips und Buchsen, ein Stapelmagazin für Chiphalter sowie fünf Montagestationen entlang der Innenseite des Schalttisches. Auf dem Schalttisch befinden sich 8 Montagehalterungen. Somit vollführt der Rundschartisch acht Schritte in einer Umdrehung mit einer Schrittweite von jeweils 45° . Ausgehend der Taktzeit werden die Leistungen der Vibrationswendelförderer und Linearförderer in der Station 2 und 3 berechnet und ausgewählt.

Aufbauelemente

Um den Konstruktionsaufwand und die Kosten gering zu halten, ist der Rundtaktautomat aus einfachen Bauteilen aufgebaut, die mehrfach an verschiedenen Stellen eingesetzt werden. Aus diesem Grund bedarf es für diese Bauteile einer eigenen Erwähnung. Die Teile, welche am häufigsten Verwendung im Rundtaktautomaten finden, sind die wesentlichen Verbindungselemente (s. Abb. 6.24). Mit diesen Verbindungselementen lassen sich die verschiedenen Funktionsträger sicher und stabil modular zusammensetzen.

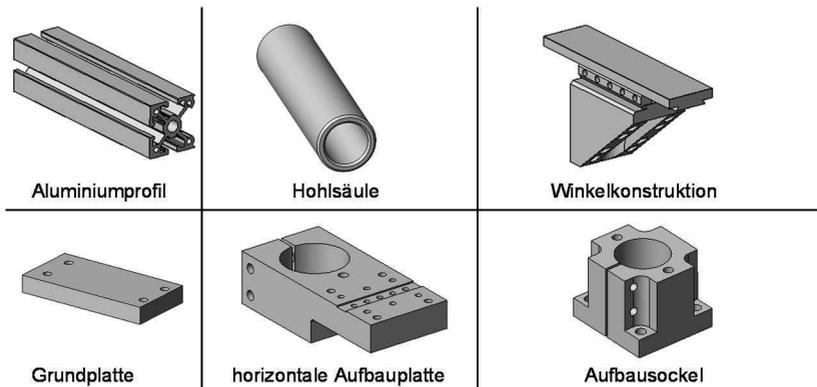


Abb. 6.24: Wesentliche Verbindungselemente [Sch17], [Sim17]

Gesamtmodell

Die einzelnen Montagestationen 1 bis 5 stehen gemeinsam auf einer Platte in der Mitte des Rundtaktautomaten und greifen von Innen auf die Werkstückhalterungen zu. Die acht Werkstückaufnahmen der Chiphalter sind auf einem Rundschalttisch angeordnet. Die Stationen für Zuführung und Auswurf ergänzen den Aufbau, wobei sie auf einem angebauten Rundschalttisch angebracht ist. Das eigentliche Gestell des Automaten hat eine achteckige Form und ergänzt den Aufbau zum Gesamtmodell (s. **Abb. 6.25**).

Planung einer Schaltschrank-SPS

Für die Inbetriebnahme des Rundtaktautomaten ist ein neuer Schaltschrank notwendig. Der zukünftige Schaltschrank des Rundtaktautomaten enthält als speicherprogrammierbare industrielle Steuerung eine SPS mit Schnittstellen für Ethernet, RT-Ethernet und Profibus DP. Um eine bessere Bedienbarkeit des gesamten Systems zu gewährleisten, wird zusätzlich ein Bedienterminal eingesetzt. Vervollständigt wird die neue elektrische Ausrüstung durch zwei Not-Aus-Kreise, Not-Aus-Taster, Hauptschalter, Quittieren-Taster, Sicherungen sowie einem Bedienfeld [Leg13]. Die Anlage besteht aus:

- dreizehn pneumatische und elektrische Schlitten, ein Rundschalttisch und vier Greifer
- zwei Vibrationswendelförderer und zwei Linearförderer

Um eine erfolgreiche Inbetriebnahme einer Anlage durchzuführen, ist es ebenfalls ratsam, im Vorlauf eine Analyse hinsichtlich des genauen Ablaufes der Montage mit Sensorik durchzuführen [Lud15]. Um die Positionen und die Anwesenheit der Werkstücke abzufragen, wird ein umfangreiches Portfolio an Sensoren zur induktiven, magnetischen und optischen Abfrage von Greif-, Dreh- und Linearmodulen geboten [Sch17]. Die Abläufe eines Funktionsträgers hängen von den Handhabungsabläufen der anderen Funktionsträger in einer Station ab und wurden durch die Weg-Schritt-Diagramme dargestellt (s. Abb. 6.14 bis Abb. 6.18). Um den ganzen Handhabungsprozess des Rundtaktautomaten zu überwachen, dienen die Werkstückabfragen der Chiphalter, Chips und Buchsen von Vibrationswendelförderer (VWF), Vibrationslinearförderer (VLF), Schachtmagazin, Zuteiler sowie Greifer. In den nachfolgenden **Tabelle 6.8** werden alle Stationen bezüglich ihrer Funktionen und ausgelösten Sensoren aufgeführt.

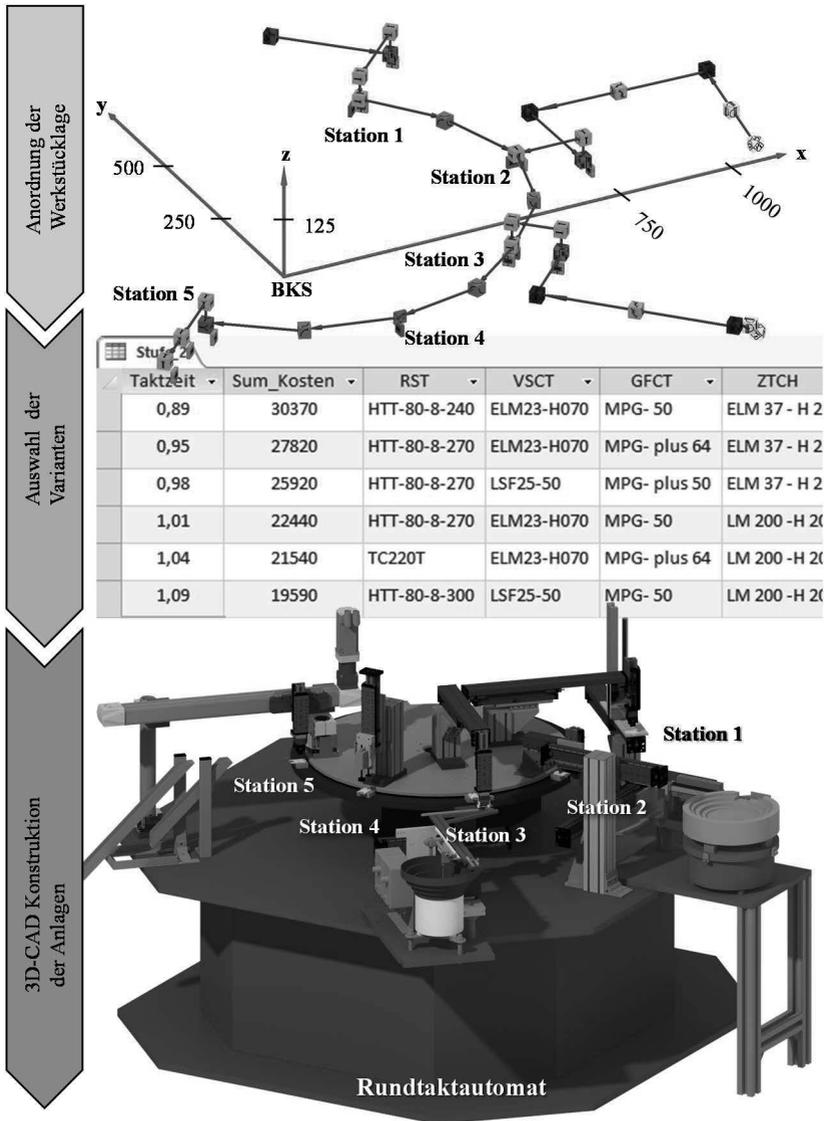


Abb. 6.25: Konstruktion der Rundtaktautomaten

Tabelle 6.8: Sensoren verwendeter Stationen

St.	Funktionsbeschreibung	St.	Funktionsbeschreibung
1	Chiphalter in Magazin	2	VWF Stau minimal
	Chiphalter nach dem Zuteilen		VLF Stau maximal und minimal
	Chiphalter in Greifer		Chip nach dem Zuteilen
	Zuteiler ein - und ausfahren		Chip in Greifer
3	Vertikalschlitten ein - und ausfahren	4	Zuteiler ein - und ausfahren
	Horizontalschlitten ein - und ausfahren		Vertikalschlitten ein - und ausfahren
	Greifer schließen und öffnen		Horizontalschlitten ein - und ausfahren
	VWF Stau minimal		Greifer schließen und öffnen
3	VLF Stau maximal und minimal	5	Spannen schließen und öffnen
	Buchse nach dem Zuteilen		Chip Prüfstempel ausfahren
	Buchse in Greifer		Vertikalschlitten ein - und ausfahren
	Zuteiler ein - und ausfahren		Greifer schließen und öffnen
3	Vertikalschlitten ein - und ausfahren	5	Baugruppe in Greifer
	Horizontalschlitten ein - und ausfahren		Vertikalschlitten ein - und ausfahren
	Greifer schließen und öffnen		Horizontalschlitten ein - und ausfahren
			Greifer schließen und öffnen

7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Planung von Montagesystemen bildet der Lösungsansatz eines integrativen Montageplanungssystems auf Basis einer neu entwickelten Symbolsprache einen innovativen Ansatz. Diese neuen Symbole (Symbole für die Funktionsträger, 3D-Symbole und parametrische Symbole) wurden im Rahmen dieser Arbeit geschaffen. Somit lassen sich Montage- und Handhabungsaufgaben deutlich und genauer formulieren.

Nachdem die Funktionsfolgen mit parametrischen Symbolen und Anforderungslisten erstellt wurden, lassen sich die standardisierten und modularen Anlagenkomponenten aus den digitalen Produktkatalogen ermitteln. Die manuelle Auswahl der FTV, mit vorgegebenen Bedingungen wie Gesamtanschaffungskosten und Taktzeit, ist zeitaufwendig und mühevoll, besonders bei großen Systemen mit verschiedenen Stationen und Funktionsträgern. Diese Arbeit bietet eine Lösung zur Programmierung von Optimierungsproblemen durch die Programmiersprache IBM CPLEX OPL. Basierend auf der Programmierung wurden die Taktzeit und Gesamtanschaffungskosten berechnet sowie geeignete FTV nach definierten Bedingungen ausgewählt.

Im Bereich der industriellen Planung von Handhabungseinrichtungen und Montagelinien lassen sich die Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit wie folgt verwerten:

- Entwicklung, Planung und Entwurf einer neuen Maschine, Handhabungseinrichtung bis hin zu Transfer- und Montagelinien
- Auswahl geeigneter Produkte von Zulieferern und Vereinfachung der Spezifikation technischer Parameter, bis hin zur Angebotserstellung bei den Zulieferern
- Parameteridentifikation und Optimierung, wie Schnittstellen der Funktionsfolgen, Taktzeiten oder Kosten

Der anschließende kombinierte Ausblick dieser Dissertation weist auf die aktuellen Forschungslücken hin, die weiter recherchiert werden sollten:

- Einzigartige Kombination aus Symbolbaustein und Steuerprogramm: Weitere Parameter können den Symbolen hinzugefügt werden, wie z. B. Drehzahl, Beschleunigung und Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung etc., damit können die Funktionsfolgen mit parametrischen Symbolen für die Steuerplanung eines Systems programmiert werden.
- Verknüpfung der Anordnung von Funktionsträger mit Ortswechselplan: Entsprechend des Ortswechselplans werden die Funktionsträger angeordnet. Wenn die Lagen der 3D-Symbole verändert werden, werden die Lagen sowie Abmessungen der Funktionsträger automatisch angepasst. Somit kann die Anordnung der Anlagen schnell entworfen sowie optimiert werden.
- Aufbau der Anlage und Messen der realen Taktzeit: die Ausführungszeiten der Varianten wurden aus den Produktkatalogen ermittelt. Deshalb gibt es immer Unterschiede zwischen der idealen und realen Taktzeit. Zum Bewerten und Prüfen der theoretischen Taktzeit soll die Anlage aufgebaut werden.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Schriften und Bücher

- [Alt09] ALTEMEIER, S.: *Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie*. Dissertation Universität Paderborn, Paderborn 2009
- [Bau13] BAUMEISTER, J.: *Nichtlineare Optimierung*. Rhein-Main Fachhochschule, Vorlesung WiSe 2013-2014, Frankfurt 2013
- [Ber11] BERGER, M.: *Montage-, Handhabungstechnik und Robotik*. Vorlesung WS 2011-2012, Technische Universität Chemnitz 2011
- [Ber17] BERGER, M.; NGUYEN-DANG, T.: *Funktionsbasierte Methode zur Optimierung der Taktzeit von Montageanlagen*. Tagungsband zur 2.Fachtagung FüMoTeC, Chemnitz 11.2017, S. 81-101, ISBN 978-3-96100-034-0
- [Ble11] BLEY, H.; REINHART, G.; SELIGER, G.; WESTKÄMPER, E.; WEINDAHL, H.-P.: *Wörterbuch der Fertigungstechnik IV*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, Berlin 2011
- [Bög15] BÖGE, A.; BÖGE, W.: *Technische Mechanik - Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre - Fluidmechanik*. Springer Vieweg, Wiesbaden 2015
- [Bok12] BOKRANZ, R, LANDAU, K.: *Handbuch Industrial Engineering - Produktivitätsmanagement mit MTM*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart 2012
- [Bra14] BRAUN, J.: *Formelsammlung - 4. Auflage*. Verlag maxon academy, Sachseln 2014

- [Bra77] BRADLEY, S.P.; HAX, A.C., MAGNANTI, T.L.: *Applied Mathematical Programming*. Addison-Wesley Publishing Company, USA 1977
- [Bre89] BREIING, A.: *Analyse und Sensibilitätsuntersuchung der wichtigsten Bewertungsverfahren*. Bericht IKB-B-002/89, ETH Zürich 1989
- [Bul86] BULLINGER, H.-J.: *Systematische Montageplanung – Handbuch für die Praxis*. Carl Hanser Verlag, München 1986
- [Cav13] CAVAZZUTI, M.: *Optimization methods – From Theory to Design*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2013
- [Chi15] CHINNECK, J, W.: *Practical Optimization*. Carleton University, Ottawa 2015
- [Con13] CONRAD, K-J.: *Grundlagen der Konstruktionslehre*. Carl Hanser Verlag, München 2013
- [Cro03] CROSER, P.; EBEL, F.: *Pneumatik - Grundstufe*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2003
- [Deu89] DEUTSCHLÄNDER, A.: *Integrierte rechneruntergestützte Montageplanung*. Dissertation Verlag Hanser München, München 1989
- [Ehr13] EHRENSPIEL, K, MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung*. Carl Hanser Verlag, München 2013
- [Eve02] EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik Arbeitsvorbereitung*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2002
- [Fel13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013

- [Fou03] FOURER, R.; GAY, D.M., KERNIGHAN, B.W.: *Ampl – A Modelling Language for Mathematical Programming*. Duxbury Press Publishing Company, USA 2003
- [Geo16] GEORGE, M.L.; ROWLANDS, D.; PRICE, M.; MAXEY, J.: *Das Lean Six Sigma Toolbook*. Verlag Franz Vahlen München, München 2016
- [Ger13] GERDTS, M.: *Einführung in die lineare und nichtlineare Optimierung*. Universität der Bundeswehr München, München 2013
- [Goe04] GOEDECKE, W.-D.: *Linearachsen im Vergleich*. 9. Tagung "Zahnriemengetriebe" am Institut für Feinwerktechnik und Elektrik-Design der TU Dresden, Dresden 2004
- [Gru13] GRUNDIG, C. G.: *Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. Carl Hanser Verlag München, München 2013
- [Hal12] HALUBEK, P.: *Simulationsbasierte Planungsunterstützung für Variantenfließfertigung*. Vulkan-Verlag, Essen 2012
- [Hau96] HAUKEN, W.; OPITZ, O.: *Mathematische Unternehmensplanung – Eine Einführung*. Verlag moderne Industrie, Landsberg 1996
- [Hei15] HEINE, A.: *Ein Beitrag zur kennwertorientierten Entwicklung kurvengesteuerter, ebener Schrittgetriebe*. Dissertation Technische Universität Chemnitz, Chemnitz 2015
- [Hel09] HELMBERG, C.: *Optimierung für Nichtmathematiker*. Vorlesung WS 2009-2010, Technische Universität Chemnitz 2009
- [Hel14] HELD, S.: *Lineare und Ganzzahlige Optimierung*. Universität Bonn, Vorlesung WiSe 2013-2014, Bonn 2014

- [Her76] HERRMANN, G.: *Analyse von Handhabungsvorgängen im Hinblick auf deren Anforderungen an programmierbare Handhabungsgeräte (PHG) in der Teilfertigung*. Dissertation Stuttgart Universität, Stuttgart 1976
- [Hes11] HESSE, S.: *Greifertechnik – Effektoren für Roboter und Automaten*. Carl Hanser Verlag, München 2011
- [Hes13] HESSE, S.: *Grundlagen der Handhabungstechnik*. Carl Hanser Verlag, München 2013
- [Hes14] HESSE, S.; SCHMITT, R.: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. Springer Vieweg, Wiesbaden 2014
- [Hes89] HESSE, S.; MITTAG, G.: *Handhabetechnik*. VEB Verlag Technik, Berlin 1989
- [Hes92] HESSE, S.: *Atlas der modernen Handhabungstechnik*. Hoppenstedt Druck GmbH, Darmstadt 1992
- [Hes93] HESSE, S.: *Montagemaschine*. Vogel Verlag und Druck KG, Würzburg 1993
- [Hub75] HUBERT, N.: *Eine Methode zur Bestimmung der Reihenfolge von Bauelementen für die Montage von Baugruppen und Erzeugnissen*. Technische Universität Dresden, Dresden 1975
- [Hub92] HUBKA, V.; EDER, W.E.: *Einführung in die Konstruktionswissenschaft*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1992
- [IBM09] IBM: *Optimization modeling with IBM ILOG OPL*. IBM Corporation, USA 2009
- [Jon00] CRISTIAN, J.: *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlage*. Herbert Utz Verlag GmbH, München 2000

- [Jun12] JUNGE, P.: *BWL für Ingenieure - Grundlagen - Fallbeispiele - Übungsaufgabe*. Springer Gabler, Wiesbaden 2012
- [Jun15] JUNGnickel, D.: *Optimierungsmethoden – Eine Einführung*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2015
- [Kal81] KALLENBACH, E.; BRÜCKNER, H.; LINDERMANN, B.; PAMEL, J.; PANIER, H.D; ZOCHER, P.; HOLLE, W.; BOSSE, F.: *Präzisionsrobotertechnik – Band II*. Technische Hochschule Ilmenau, Ilmenau 1981
- [Kon03] KONOLD, P.; REGER, H.: *Praxis der Montagetechnik – Produktdesign, Planung, Systemgestaltung*. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2003
- [Kra99] KRAHN, H.; NÖRTHEMANN, K.-H.: *Konstruktionselement 3 – Beispielsammlung für die Montage- und Zuführtechnik*. Vogel Buchverlag und Druck GmbH & Co. KG, Würzburg 1999
- [Leg13] LEGLER, C.: *Vorbereitung der Inbetriebnahme eines Rundtaktautomaten für das studentische Praktikum*. Studienarbeit Technische Universität Chemnitz, Chemnitz 2013
- [Len13] LENARČIČ, J.; BAJD, T.; STANIŠIĆ, M.M.: *Robot Mechanisms*. Springer Science Business Media, Dordrecht 2013
- [Lin16] LINNERMANN, H.: *Robotertechnik*. Beuth Hochschule für Technik, Berlin 2016
- [Lof01] LOFERER, M.: *Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen*. Dissertation Technische Universität München, München 2001
- [Löh77] LÖHR, H.-G.: *Eine Planungsmethode für automatische Montagesysteme*. Otto Krausskopf Verlag GmbH, Mainz 1977

- [Lot92] LOTTER, B.: *Wirtschaftliche Montage*. VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1992
- [Lot12] LOTTER, B.; WIENDAHL, H.-P. (HRSG.): *Montage in der industriellen Produktion*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2012
- [Loy10] LOY, M.: *Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilzuführung*. Dissertation Technische Universität München – Herbert Utz Verlag GmbH, München 2010
- [Lud15] LUDWIG, J.: *Inbetriebnahme eines Rundtaktautomaten*. Projektarbeit Technische Universität Chemnitz, Chemnitz 2015
- [Man15] MANITZ, M.; CLAUS, T.; HERRMANN, F.: *Produktionsplanung und -steuerung*. Springer - Verlag, Berlin Heidelberg 2015
- [Mär11] MÄRZ, L.; KRUG, W.; ROSE, O.; WEIGERT, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2011
- [Mar12] MARTIN, R.: *Microsoft Visio 2010 - Das Handbuch*. Microsoft Press, Deutschland 2012
- [Mor93] MORÉ, J.J.; WRIGHT, S.J.: *Optimization Software Guide*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia 1993
- [Ngu15a] NGUYEN-DANG, T.; BERGER, M.: *Erweitertes Planungskonzept für Handhabungs- und Montageanlagen durch parametrisierte Elementarfunktionen und modulare Symbolbibliotheken*. Tagungsband zur 1.Fachtagung FüMoTeC, Chemnitz 11.2015, S. 157-183, ISBN 978-3-944640-63-1
- [Ngu15b] NGUYEN-DANG, T.; BERGER, M.: *Research and Application of Functional Elements and Newly Defined Function Symbols*

- for Mechanical Handling Systems*. Asean Engineering Journal, 09.2015, S. 28-37, Volume 5 Number 2 ISSN 2229-127X
- [Pap15] PAPAGEOURGIU, M.; LEIBOLD, M.; BUSS, M.: *Optimierung – Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2015
- [Pfe09] PFEILE, T.; SCHMITT, R.: *Fertigungsmesstechnik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München 2009
- [Prö15] PRÖPSTER, M.H.: *Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzungsfahrzeugbaus*. Dissertation Technische Universität München, München 2015
- [Ric84] RICHTER, E.; SCHILLING, M.: *Tabellenbuch Montage – Wissensspeicher für die Werkmontage*. VEB Verlag Technik, Berlin 1984
- [Röm14] RÖMISCH, P.; WEIB, M.: *Projektierungspraxis Verarbeitungsanlagen*. Springer Vieweg, Wiesbaden 2014
- [Rot01] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 2 Kataloge*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2001
- [Sau94] SAUER, H.-P.: *Auswahlkriterien von Siebmaschinen in der Aufbereitungstechnik*. Aufbereitungs-techn.35 S 367-372 (1994)
- [Sch13] SCHREIER, H.: *Diskrete Optimierung*. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Vorlesung SoSe 2013, Freiberg 2013
- [Sch78] SCHIMKE, E.-F.: *Planung und Einsatz von Industrierobotern*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1978
- [Sch88] SCHULZE, M.A.: *Linear Programming for Optimization*. Perceptive Scientific Instruments, Inc., Texas 1988

- [Sch89] SCHÖNINGER, J.: *Planung taktzeitoptimierter flexibler Montagestationen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1989
- [Spi14] SPILLNER, R.: *Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion*. Dissertation Technische Universität München, Herber Utz Verlag, Hamburg 2014
- [Spu14] FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G.: *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. Carl Hanser Verlag, München 2014
- [TGL81] TGL 28482.: *Werkzeugmaschinen - Werkstückflussaufgaben, Begriffe, Sinnbilder*, August 1981
- [Tho07] THOMMEN, J.P.: *Betriebswirtschaftslehre*. Versus Verlag AG, Zürich 2007
- [Töp05] TÖPFER, A.: *Betriebswirtschaftslehre - Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2005
- [Ung10] UNGER, T.; DEMPE, S.: *Lineare Optimierung – Modell, Lösung, Anwendung*. Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden 2010
- [Van08] VANDERBEI, R.J.: *Linear Programming*. Springer-Verlag, New York 2008
- [Ven10] VENTER, G.: *Review of Optimization Techniques*. John Wiley & Sons, Ltd., USA 2010
- [Vol87] VOLMER, J.: *Getriebetechnik - Lehrbuch*. VEB Verlag Technik, Berlin 1987
- [Vol92] VOLMER, J.: *Industrieroboter - Funktion und Gestaltung*. Verlag Technik GmbH Berlin, München 1992

- [Web16] WEBER, K. H.: *Engineering verfahrenstechnischer Anlagen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2016
- [Wei08] WEIGERT, G.; HENLICH, T; KLEMMT, A.: *Methode zur Modellierung und Optimierung von Montageprozessen*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008
- [Wei14] WEIDNER, R. S.: *Wissensbasierte Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrtindustrie*. Dissertation Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg 2014
- [Wes01] WESTKÄMPER, E.; BULLINGER, H.-J.; HORVÁTH, P.; ZAHN, E.: *Montageplanung – effizient und marktgerecht*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2001
- [Zie08] ZIEGLER, J.W.: *Handhabungs- und Montagetechnik*. Skriptum zur Vorlesung, Fachhochschule Düsseldorf, Düsseldorf 2008
- [Zwi09] ZWIERS, U.: *Kinematik des starren Körpers*. Skriptum zur Vorlesung, Hochschule Bochum, Bochum 2009

8.2 Normen, Richtlinien und Patente

- [DIN8593] Fertigungsverfahren Fügen – *Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Stand 2003
- [VDI2221] Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb – *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH, Stand 1993
- [VDI2222] Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb – *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH, Stand 1997

- [VDI2860] Montage- und Handhabungstechnik – *Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definition, Symbole*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH, Stand 1990
- [VDI3260] Elektrische Steuerungen – *Funktionsdiagramme von Arbeitsmaschinen und Fertigungsanlagen*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH, Stand 1977
- [VDI3300] Materialfluss – Untersuchungen und -Kosten – *Materialfluss - Untersuchungen*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH, Stand 1973

8.3 Onlinequellen

- [ABB18] ABB: *IRB 360 - FlexPicker*. Online verfügbar unter: <http://new.abb.com/products/robotics/> (Zugriff 12.05.2018)
- [Afa17] AFAG: *Zuführtechnik Baukasten 2017*. Online verfügbar unter: <https://www.afag.com> (Zugriff 22.11.2017)
- [Bal17] BALLUFF GMBH: *Objekterkennung und Ergänzungsband*. Online verfügbar unter: <http://www.balluff.com> (Zugriff 22.11.2017)
- [Dom17] DOMINO MODUL AG.: *Handling Komponenten*. Online verfügbar unter: <http://www.domino-modul.com/> (Zugriff 01.12.2017)
- [Dud17] DUDEN: *Handhaben - Bedeutungsübersicht*. Online verfügbar unter: <http://www.duden.de> (Zugriff 22.11.2017)
- [Edr17] EDRAWSOFT: *3D Network Diagram – Creat 3D Network Diagram rapidly with examples and templates*. Online verfügbar unter: <https://www.edrawsoft.com/3d-network.php> (Zugriff 22.11.2017)

- [Fer01] FERARIC, J.P.: *Höchste Produktivität durch eine optimierte Gesamtlösung* . Online verfügbar unter: <http://www.all-electronics.de/> (Zugriff 24.07.2017)
- [Fes17] FESTO VERTRIEB GMBH &CO. KG: *Produktkatalog*. Online verfügbar unter: <https://www.festo.com> (Zugriff 22.11.2017)
- [Han17] HANS BÖCKLER STIFTUNG: *Der Auto-König*. Online verfügbar unter: <http://www.boeckler.de> (Zugriff 22.11.2017)
- [Har18] HARO ANLAGEN- UND FÖRDERTECHNIK GMBH.: *Rollenbahnen* . Online verfügbar unter: <https://www.haro-gruppe.de/> (Zugriff 21.04.2017)
- [Hei17] HEINZ AUTOMATIONS-SYSTEME GMBH: *Globoid-Rundschaftische*. Online verfügbar unter: <http://heinz-automation.de> (Zugriff 22.11.2017)
- [IBM17] IBM SOFTWARE : *Cplex Optimizer*. Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/us-en/> (Zugriff 03.01.2017)
- [Key17] KEYENCE CORPORATION: *Berührungslose Messtechnik Gesamtkataloge*. Online verfügbar unter: <http://www-se-arch.keyence.de> (Zugriff 22.11.2017)
- [Kön17] DRUCKLUFT KÖNITZER.: *Pick and Place* . Online verfügbar unter: <http://www.druckluft-koenitzer.de/http://www.nak-automation.de/> (Zugriff 01.10.2017)
- [Kuk18] KUKA ROBOTER.: *Industrieroboter* . Online verfügbar unter: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/http://www.zipatec.de/produkte> (Zugriff 14.05.2018)
- [Lea17] LEAN PRODUCTION EXPERT: *Taktzeitdiagramm*. Online verfügbar unter: <http://www.lean-production-expert.de> (Zugriff 13.12.2017)

- [Lis17] LIST OF FREEWARE: *10 Best Free Flowchart Software for Windows*. Online verfügbar unter: <http://listoffreeware.com> (Zugriff 22.11.2017)
- [Nor17] NORELEM NORMELEMENGE KG.: *Bewegen* . Online verfügbar unter: <https://www.norelem.de/de/de/Home.html> (Zugriff 01.12.2017)
- [Pif18] PIFA GMBH: *Produktkatalog*. Online verfügbar unter: http://www.fipa.com/de_DE/ (Zugriff 21.04.2018)
- [Por17] PORSCHE AG: *Die Montage, - Exterieur Linie*. Online verfügbar unter: <https://www.porsche-leipzig.com> (Zugriff 22.11.2017)
- [Rex17] BOSCH REXROTH AG: *Produktkatalog*. Online verfügbar unter: <https://www.boschrexroth.com/de/de> (Zugriff 22.11.2017)
- [Sch17] SCHUNK GMBH: *Produktkatalog*. Online verfügbar unter: <http://de.schunk.com> (Zugriff 22.11.2017)
- [Sew17] SEW-EURODRIVE : *Kegelradgetriebe*. Online verfügbar unter <https://www.sew-eurodrive.de/> (Zugriff 10.03.2017)
- [Sim17] SIM AUTOMATION: *Montageautomation*. Online verfügbar unter: <http://www.sim-automation.de> (Zugriff 22.11.2017)
- [SMC17] SMC PNEUMATIK GMBH.: *Pneumatische Greifer* . Online verfügbar unter: <https://www.smc.eu/> (Zugriff 01.12.2017)
- [Tak17] TAKTOMAT: *Rundschtittische Typ RT*. Online verfügbar unter: <http://www.taktomat.de> (Zugriff 22.11.2017)
- [Wei17] WEISS GMBH: *Fest Taktender Rundschtittisch TC*. Online verfügbar unter: <http://www.weiss-gmbh.de> (Zugriff 22.11.2017)

- [yEd17] YED GRAPH EDITOR: *Tools and Application*. Online verfügbar unter <http://www.yworks.com/> (Zugriff 24.01.2017)
- [Zim17] ZIMMER GROUP: *Produktkatalog*. Online verfügbar unter: <http://www.zimmer-group.de> (Zugriff 22.11.2017)
- [ZIP17] ZIPATEC MONTAGETECHNIK GMBH.: *Greifmodule* . Online verfügbar unter: <http://www.zipatec.de/produkte> (Zugriff 01.12.2017)

9 Anhang

9.1 Zusammenstellung der Symbole

9.1.1 Handhabungssymbole nach VDI 2860

"Handhabeobjekte, als geometrisch bestimmte Körper, besitzen bzgl. eines Bezugskoordinatensystems 6 mögliche Freiheitsgrade im Raum – jeweils 3 translatorische Freiheitsgrade (**Positionierungsgrad PG**) und 3 rotatorische Freiheitsgrade (**Orientierungsgrad OG**). Der Ordnungszustand gibt an, in wie vielen Freiheitsgraden die räumliche Ausrichtung eines Körpers definiert ist. Es werden somit beide Kenngrößen (OG und PG) im Ordnungszustand zusammengefasst. Der Ordnungszustand eines Körpers ist definiert als

OZ = OG/PG." [Ber11]

Das Handhaben gliedert sich in fünf Funktionsgruppen (s. **Tabelle 9.1**). Eine weitere Unterteilung ergibt sieben Elementarfunktionen (Teilen, Vereinigen, Drehen, Verschieben, Halten, Lösen, Prüfen) und zusammengesetzte Funktionen.

- Gruppe "**Speichern**": Speicher dienen als Puffer zwischen oder nach Arbeitsstationen. In den Bereichen der Montage- und Handhabungstechnik kommen Beschickungsspeicher am häufigsten zur Anwendung.
- Gruppe "**Mengen verändern**": In automatisierten Produktionsprozessen müssen die Werkstücke zu den Arbeitsplätzen bzw. Stationen zugeführt und zugeteilt werden. Deshalb werden die Mengen von Werkstücken im Materialfluss verändert. In den Bereichen der Montage- und Handhabungstechnik werden u.a. die Funktionen *Zuteilen*, *Verzweigen* und *Sortieren* sehr häufig verwendet, welche sich aus den Elementarfunktionen *Teilen* und *Vereinigen* bilden lassen.
- Gruppe "**Bewegen**": Das *Bewegen* verändert die räumliche Anordnungen von Körpern in einem Bezugskoordinatensystem. Abhängig

von veränderten Orientierungen und/oder Positionen von Werkstücken können unterschiedliche Funktionen in der Gruppe *Bewegen* definiert werden, wobei *Drehen* und *Verschieben* Elementarfunktionen sind.

- Gruppe "**Sichern**": Zum vorübergehenden Aufrechterhalten der Lage eines Körpers werden die Funktionen *Halten* und *Lösen* als Elementarfunktion benutzt.
- Gruppe "**Kontrollieren**": Zur Feststellung, ob bestimmte Eigenschaften erfüllt sind oder Eigenschaften vorgegebenen, vergleichenden Bezugsgrößen entsprechen, wird die Gruppe *Kontrollieren* genutzt. Während des Handhabens werden Funktionen wie *Identität prüfen*, *Anwesenheit prüfen*, *Orientierung* und/oder *Position prüfen* häufig benutzt, welche sich alle auf die Elementarfunktion *Prüfen* beziehen.

Tabelle 9.1: Anlehnung an die Symbole nach VDI 2860

VDI 2860	Andere Quellen	Bezeichnung	Bedeutung
Gruppe " Speichern "			
	 [TGL81]	geordnetes Speichern	Aufbewahren geometrisch bestimmter Körper, wobei Orientierung und Position der Körper in allen Freiheitsgraden definiert sind (OZ = 3/3)
	 [TGL81]	teilgeordnete Speichern	Aufbewahren geometrisch bestimmter Körper, wobei Orientierung und Position der Körper nur in einem Teil ihrer Freiheitsgrade definiert sind (0/0 < OZ < 3/3)

VDI 2860	Andere Quellen	Bezeichnung	Bedeutung
	 [TGL81]  [Löh77]	ungeordnetes Speichern	Aufbewahren geometrisch bestimmter Körper, wobei Orientierung und Position der Körper in allen Freiheitsgraden beliebig sind ($OZ = 0/0$)

Gruppe "Mengen verändern"

		Teilen	Bilden von Teilmengen aus einer Menge, wobei die Größe von Ausgangs- und Zielmengen nicht definiert ist
		Vereinigen	Bilden einer Menge aus Teilmengen, wobei die Größe von Ausgangs- und Zielmengen nicht definiert ist
		Abteilen	Bilden von Teilmengen definierter Größe oder Anzahl aus einer Menge
	 [TGL81]	Zuteilen	Bilden von Teilmengen definierter Größe oder Anzahl und das Bewegen dieser Teilmengen zu definierten Zielorten
	 [TGL81]	Verzweigen	Auflösen eines Mengenstromes in Teilmengenströme

VDI 2860	Andere Quellen	Bezeichnung	Bedeutung
	 [TGL81]	Zusammenführen	Bilden eines Mengenstromes aus Teilmengenströmen
		Sortieren	Zuordnen und Teilen einer Menge von unterschiedlichen Körpern nach bestimmten Merkmalsklassen

Gruppe "**Bewegen**"

	 [TGL81]  [VDI3260]	Drehen	Bewegen eines Körpers aus einer bestimmten in eine andere bestimmte Orientierung um eine durch einen körpereigenen Bezugspunkt verlaufende Achse; die Position des körpereigenen Bezugspunktes bleibt unverändert.
	 [VDI3260]	Verschieben	Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position durch Translation entlang einer Geraden; die Orientierung des Körpers bleibt unverändert.
	 [TGL81]  [VDI3260]	Schwenken	Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Orientierung und Position durch Rotation um eine körperferne Achse

VDI 2860	Andere Quellen	Bezeichnung	Bedeutung
		Orientieren	Bewegung eines Körpers aus einer unbestimmten in eine vorgegebene Orientierung; die Position des Körpers bleibt außer Betracht.
	 [TGL81]	Positionieren	Bewegung eines Körpers aus einer unbestimmten in eine vorgegebene Position; die Orientierung des Körpers bleibt außer Betracht.
	 [TGL81]	Ordnen	Bewegen von Körpern aus einer unbestimmten in eine vorgegebene Orientierung und Position bzw. Bewegungsrichtung
	 [TGL81]	Führen	Bewegen von Körpern aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position entlang einer definierten Bahn; die Orientierung der Körper ist jedem Punkt der Bewegung definiert
		Weitergeben	Bewegen von Körpern aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position entlang einer nicht definierten Bahn; der Orientierungsgrad der Körper bleibt unverändert.
		Fördern	Bewegung von Körpern aus einer beliebigen in eine andere beliebige Position; Bewegungsbahn und Orientierung der Körper während

VDI 2860	Andere Quellen	Bezeichnung	Bedeutung
			der Bewegung sind nicht notwendigerweise definiert.

Gruppe "Sichern"

	 [TGL81]	Halten	Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position
	 [TGL81]	Lösen	Umkehrung des Haltens
	 [TGL81]	Spannen	Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position unter Beteiligung von Kraftschluss
	 [TGL81]	Entspannen	Umkehrung des Spannsens

Gruppe "Kontrollieren"

		Prüfen	Feststellen, ob Körper vorgegebene Bedingungen erfüllen
	 [TGL81]	Anwesenheit prüfen	Feststellen, ob Körper in einem definierten Bereich vorhanden sind
	 [TGL81]	Identität prüfen	Feststellen, ob Körper vorgegebene Eigenschaften erfüllen

VDI 2860	Andere Quellen	Bezeichnung	Bedeutung
		Form prüfen	Feststellen, ob Körper eine vorgegebene Form haben.
		Größe prüfen	Feststellen, ob Körper eine vorgegebene Größe bzw. vorgegebene Abmessungen haben
		Farbe prüfen	Feststellen, ob Körper oder bestimmte Körperflächen vorgegebene Farben haben
		Gewicht prüfen	Feststellen, ob Körper ein vorgegebenes Gewicht haben
		Position prüfen	Feststellen, ob sich Körper an vorgegebenen Punkten in einem Bezugskordinatensystem befinden
	 [TGL81]	Orientierung prüfen	Feststellen, ob Körper eine vorgegebene Orientierung im Hinblick auf ein vorgegebenes Bezugskordinatensystem haben
		Messen	Feststellen eines Wertes als Vielfaches einer Bezugsgröße
		Zählen	Feststellen einer Anzahl von Körpern
		Position messen	zahlenmäßiges Feststellen der Ist-Position von Körpern in einem Bezugskordinatensystem
		Orientierung messen	zahlenmäßiges Feststellen der Ist-Orientierung von Körpern in einem Bezugskordinatensystem

9.1.2 Neue Handhabungssymbole

Im heutigen industriellen Umfeld kommen vermehrt Anlagen und Module als Standardapplikationen für Pick & Place Geräte zum Ersatz, welche aktuell nur durch zusammengesetzte Funktionen beschreibbar sind.

Die neu entworfene und zusammengesetzte Funktion "2D-Pick & Place" ist in **Abb. 9.1** (rechts) hierzu beispielhaft dargestellt, welche im Grunde genommen der Funktion "Führen" weitestgehend entspricht, da sie ebenso das Bewegen von Körpern aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position, unter Kenntnis der Orientierung an jedem Punkt der Bewegung, definiert. Sie wurde genau wie die bereits bekannte Funktion "Ordnen" (als Vergleich links) als zusammengesetzte Funktion definiert und erlaubt darüber hinaus auch noch die Vorgabe unterschiedlicher rotatorischer (R) und/oder translatorischer (T) Bewegungsabfolgen, so dass für einen Anlagenplaner der Zusammenhang zwischen Werkstückbewegung und hierzu passendem Funktionsträger vereinfacht wird.

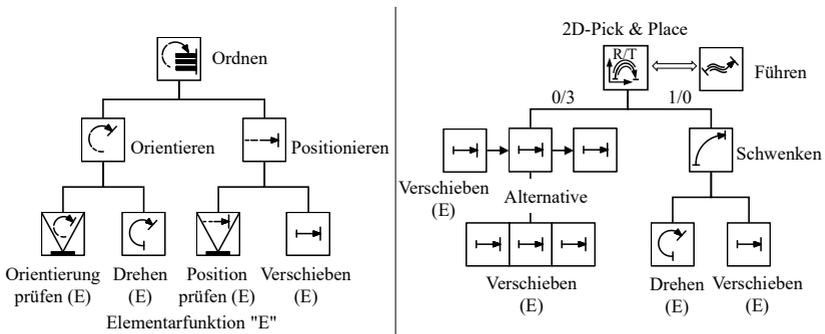


Abb. 9.1: Vergleich zweier zusammengesetzter Funktionen: "Ordnen" [VDI2860] und "2D-Pick & Place"

Im Sinne einer weiterführenden Vereinfachung der Symbolsprache wurden daher zusätzlich neue Handhabungssymbole nach **Tabelle 9.2** geschaffen.

Tabelle 9.2: Neue Symbole für zur Pick & Place - Handhabung

Symbol	Bezeichnung	Bedeutung
	2D - Pick & Place	Bewegen eines Körpers in einer Ebene aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position durch n Translationen (T) oder eine Rotation. Die Translationen können nacheinander oder gleichzeitig ablaufen (s. Abb. 9.2). Die Orientierung des Körpers bleibt dabei unverändert.
	3D - Pick & Place	Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Orientierung und Position durch n Rotationen (R) um eine körperferne Achse und m Translationen (T). Die Rotationen und Translationen können nacheinander oder gleichzeitig ablaufen (s. Abb. 9.2).

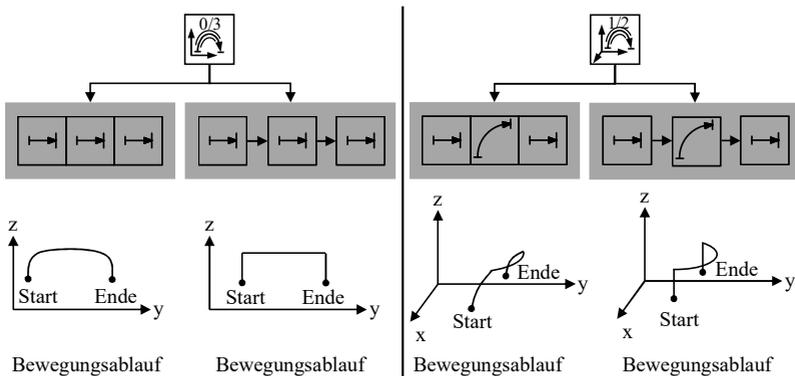


Abb. 9.2: kombinierte Translationen und Rotationen

9.1.3 Neue Symbole zur Ermittlung der Funktionsträger (Werkzeuge)

Alle Symbole für die Werkzeuge wurden neu erstellt. Diese Symbole können dem Anwender als orientierende Bibliothek dienen, um einen Funktionsträger bzw. eine FTL bereits während der Konzeptphase für einen Handlungsablauf zu spezifizieren. Dabei gilt folgende Nomenklatur:

Bewegungsablauf: Die verschiedenen Funktionsträgervarianten werden aus rotatorischen und/oder translatorischen Bewegungen kombiniert und deren Bewegungsverläufe in einem Weg-Schritt-Diagramm vereinfacht dargestellt. Diese Bewegungen können fortlaufend, oszillierend oder schrittweise sein. Insbesondere die Bewegungsabläufe der Gruppe "Mengen verändern" und "Bewegen" werden so symbolisiert.

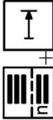
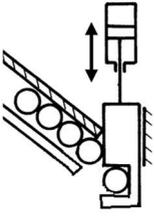
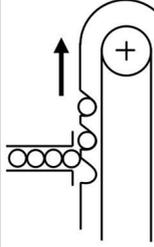
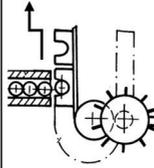
Arbeitsprinzip: Funktionsträger können nach verschiedenen Merkmalen eingeordnet werden. Das Arbeitsprinzip ist ein Merkmal zur übersichtlichen Einordnung eines Funktionsträgers. Basierend auf dem Arbeitsprinzip wird die symbolische Darstellung für Werkzeuge erstellt (s. **Tabelle 9.3**).

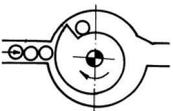
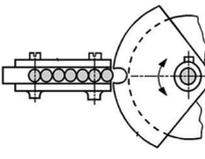
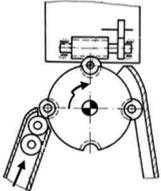
Antriebsprinzipien (Abkürzung **A**): Neben der aus dem Symbol klar ersichtlichen Definition der Bewegungsart (translatorisch/rotatorisch) und des Bewegungsablaufs (oszillierend/fortlaufend/schrittweise) können auch zusätzliche und z. B. die Antriebsart oder Anschlussbedingungen (**A**) spezifizierende Informationen im Symbol hinterlegt werden. Durch Kombination von Linear- und Drehkomponenten lassen sich alle Bewegungsabläufe einer Einrichtung zusammensetzen. Die Linear-, Dreh- und Schwenkeinheiten sind bausteinförmig konzipiert und werden in unterschiedlichen Handhabungsgeräten eingesetzt. **Tabelle 9.3** zeigt beispielhaft die Symbole der Linear-, Dreh- und Schwenkeinheiten. Damit können diese symbolischen Darstellungen für die Handhabungsfunktionen als Antriebsarten ausgewählt werden.

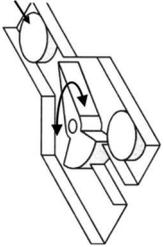
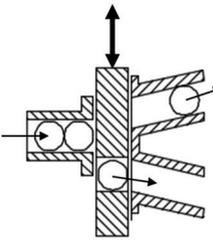
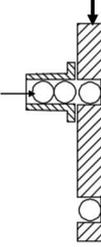
Tabelle 9.3: Symbolische Darstellungen für die Werkstückhandhabung und Funktionsträger

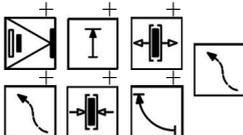
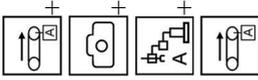
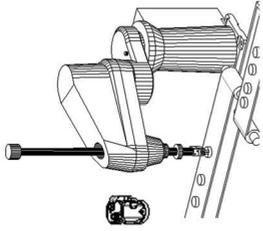
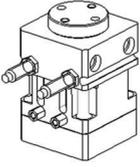
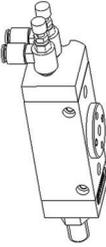
(1*)	(2*)	(3*)	(4*)	(5*)	(6*)	(7*)
Symbole zur Ermittlung der Funktionsträger (Beispiele)						
				Linienanordnung	Körper sind in einer Linienanordnung mit Führung aufbewahrt.	
				Flächenanordnung	Körper sind in einer Flächenanordnung aufbewahrt.	
				Bunker	Körper sind in einem abgegrenzten Raum aufbewahrt.	

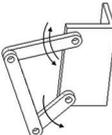
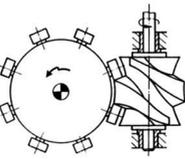
(1*) übernommenes / neues Symbol; (2*) 3D-Symbol; (3*) Auflösung der Funktion in Teilfunktionen (Bsp.); (4*) neue Symbole; (5*) Bezeichnung; (6*) Bedeutung; (7*) Funktionsträger - Bsp.

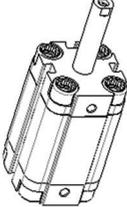
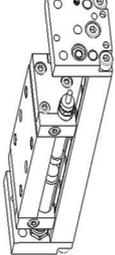
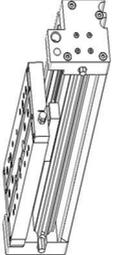
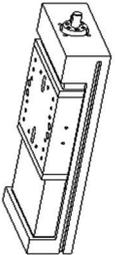
				<p>Zuteilschieber</p>	<p>Teilmengen definierter Anzahl sind gebildet und bewegen sich translatorisch; Beispiele technischer Umsetzung: Linearmodule (Werkzeuge für Funktion "Verschieben" in diese Tabelle) oder Schubkurven, Koppelgetriebe, Kurvengetriebe usw.</p>	 <p>pneumatischer Zuteilschieber [Hes92]</p>
				<p>Zuteilzahnriemen</p>	<p>Teilmengen bewegen sich translatorisch. Das Bewegen des Werkzeugs ist durch ein fortlaufendes Förderband realisiert; Beispiele technischer Umsetzung: Räder-, Zugmittelgetriebe, servoelektrische Antriebe usw.</p>	 <p>Zuteilzahnriemen [Hes92]</p>
				<p>Zuteilkette</p>	<p>Teilmengen bewegen sich translatorisch. Das Bewegen des Werkzeugs ist durch eine schrittweise Förderkette realisiert; Beispiele technischer Umsetzung: Schrittgetriebe wie Malteserkreuz-, Globoidschritt-, oder Kurvenschrittgetriebe usw.</p>	 <p>Zuteilkette [Hes92]</p>

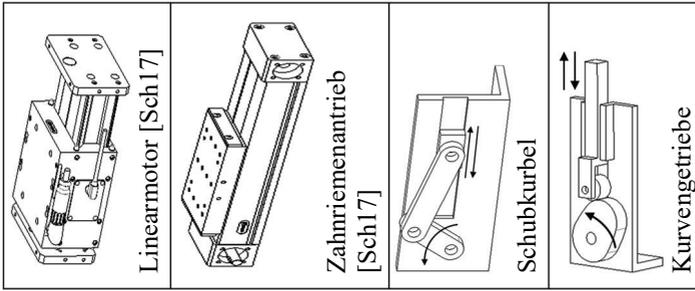
				<p>Zuteildreh- schieber</p>	<p>Teilmengen bewegen sich ro- tatorisch. Das Bewegen des Werkzeugs ist durch einen fortlaufenden Drehschieber re- alisiert; Beispiele technischer Umsetzung: Räder-, Zugmit- telgetriebe, servoelektrische Antriebe usw.</p>	 <p>Drehschieber [Hes92]</p>
				<p>Zuteilschwenk- segment</p>	<p>Teilmengen bewegen sich ro- tatorisch. Das Bewegen des Werkzeugs ist durch ein oszil- lierendes Schwenksegment re- alisiert; Beispiele technischer Umsetzung: Drehmodule (Werkzeuge für Funktion "Drehen" in dieser Tabelle), Kurbelschwinge, Kurvengen- triebe usw.</p>	 <p>Schwenksegment [Hes92]</p>
				<p>Zuteildrehteller</p>	<p>Teilmengen bewegen sich ro- tatorisch. Das Bewegen des Werkzeugs ist durch einen schrittweisen Drehteller reali- siert; Beispiele technischer Umsetzung: Schrittgetriebe</p>	 <p>Drehteller [Hes92]</p>

 <p>Weiche [Hes13]</p>	 <p>Zuteilschieber [Hes92]</p>	 <p>Zuteilschieber</p>
<p>Ein Mengenstrom wird in zwei Mengenströme durch eine Weiche aufgelöst.</p>	<p>Ein Mengenstrom wird in zwei Mengenströme durch einen Schieber aufgelöst.</p>	
<p>Zweifachzuteilweiche</p>	<p>Zweifachzuteilschieber</p>	<p>Zweifachzuteilschieber</p>
		
 	 	 
		
		

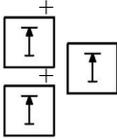
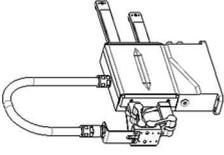
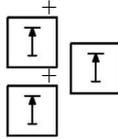
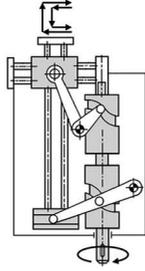
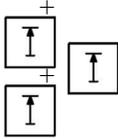
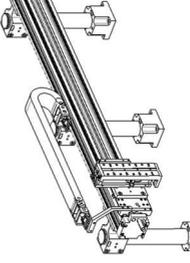
				<p>Sortieren durch Bildverarbeitungssystem und Roboter</p>	<p>Teilen einer Menge von unterschiedlichen Körper nach bestimmten Sortierparametern; Beispiele technischer Umsetzung: Roboter mit Bildverarbeitungssystem und Förderband zu Transport der Objekte</p>	 <p>Sortieren durch Bildverarbeitungssystem und Roboter [Kuk18]</p>
			<p>pneumatischer Schwenkflügel (DPF)</p>	<p>pneumatischer Schwenkflügel (DPE)</p>	<p>Bewegen eines Körpers aus einer bestimmten in eine andere bestimmte Orientierung um eine durch einen körper-eigenen Bezugspunkt verlaufende Achse; Beispiele technischer Umsetzung: Greifer mit Schwenkflügel oder Schwenkeinheit, Dreheinheit, Kurbelschwinge, Kurvengetriebe usw.</p>	 <p>Schwenkflügel [Sch17]</p>
			<p>pneumatischer Schwenkeinheit (DPE)</p>			 <p>Schwenkeinheit [Sch17]</p>

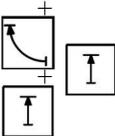
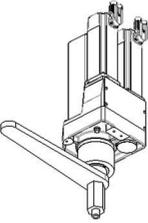
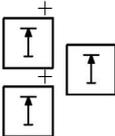
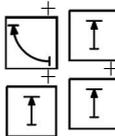
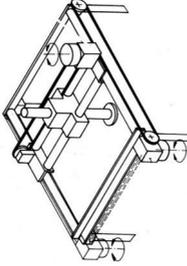
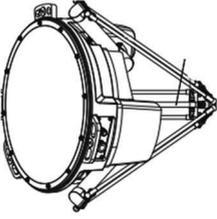
			
			
			
<p>elektrische Drehheit (DEE)</p>	<p>Kurbel- schwin- ge (DKB)</p>	<p>Kurvenschrit- getriebe (DKS)</p>	<p>Kurveng- triebe (DKG)</p>
 <p>Drehheit [Sch17]</p>	 <p>Kurbelschwinge</p>	 <p>Kurvenschritgetriebe [Vol87]</p>	 <p>Kurvengetriebe</p>

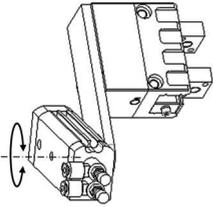
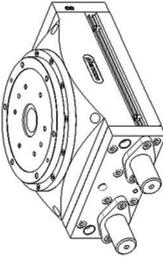
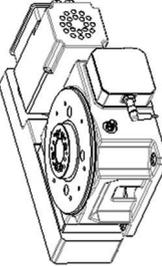
			<p>pneumatischer Zylinder (SPZ)</p>	 <p>Pneumatikzylinder [Fes17]</p>
			<p>pneumatische Lineareinheit (SPE)</p>	 <p>Linearmodul [Sch17]</p>
			<p>Kolbenstan- genloser Pneumatikzylinder (SPK)</p>	 <p>Kolbenstan- genloser Pneumatikzylinder [Sch17]</p>
			<p>Spindelantrieb (SES)</p>	 <p>Spindelantrieb [Sch17]</p>
<p>Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position durch Translation entlang einer Geraden; Beispiel technischer Umsetzung: Linearmodul mit einem Greifer Linearmodule ebenso für Pick & Place Aufgaben geeignet</p>				

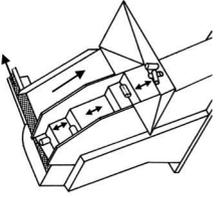
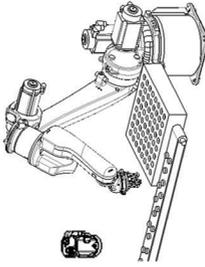
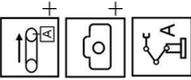
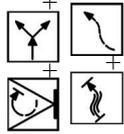
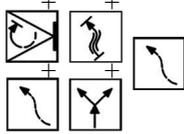
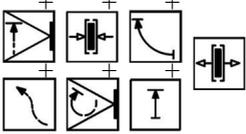


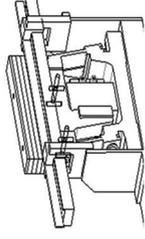
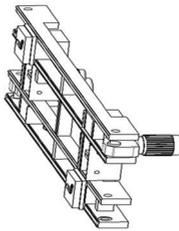
Linearmotor (SEL)	Zahnriemenantrieb (SEZ)	Schubkurbel (SSK)	Kurvgetriebe (SKG)
			
			
			

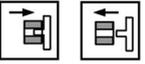
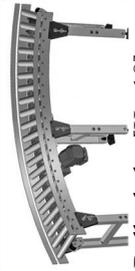
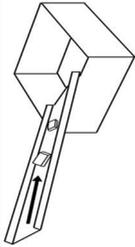
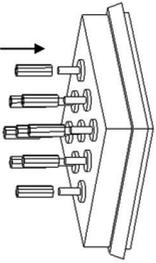
 <p>2D Pick & Place</p>			<p>Pick & Place Einheit</p>	<p>Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position durch Translation entlang einer Geraden; in vertikaler und horizontaler Richtungen angetrieben</p>	 <p>Pick & Place [Wei17]</p>
			<p>Pick & Place Einheit</p>		 <p>Pick & Place [Ber11]</p>
			<p>Linearportal</p>		 <p>Linearportal [Sch17]</p>

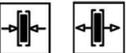
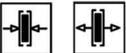
 <p>3D Pick & Place</p>			<p>Hub-Dreheinheit</p>	<p>Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position und/oder Orientierung; Beispiele technischer Umsetzung: Hub-Dreheinheit, Raumportal, oder Roboter wie z. B. Parallelroboter</p>	 <p>Hub-Dreheinheit [Wei17]</p>
		<p>Raumportal</p>	 <p>Raumportal [Ber11]</p>		
	 <p>Parallelroboter [ABB18]</p>				

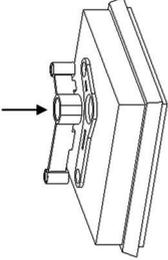
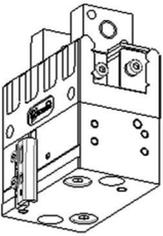
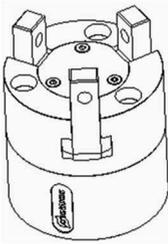
				<p>Schwenkflügel (DPF)</p>	<p>Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Orientierung und Position durch Rotation um eine körperferne Achse; Beispiele technischer Umsetzung: Schwenkflügel, Schwenkeinheit usw.</p>	 <p>Schwenken durch Schwenkeinheit</p>
				<p>pneumatischer Rundschtaltisch</p>	<p>Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Orientierung und Position durch Rotation um eine körperferne Achse; Beispiel technischer Umsetzung: Rundschtaltisch</p>	 <p>RST [Sch17]</p>
				<p>Elektromechanischer Rundschtaltisch</p>	<p>Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Orientierung und Position durch Rotation um eine körperferne Achse; Beispiel technischer Umsetzung: Rundschtaltisch</p>	 <p>RST [Weil7]</p>

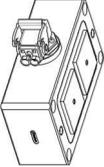
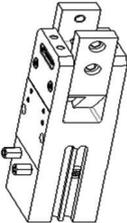
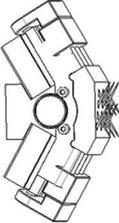
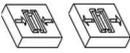
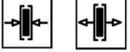
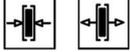
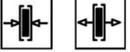
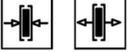
 <p>Vibrationswendelförderer</p>	 <p>Stufenförderer [Hes92]</p>	 <p>Ordnen durch Auslesen mit Knickarmroboter [Kuk18]</p>
<p>Bewegen von Körpern aus einer unbestimmten in eine vorgegebene Orientierung und Position bzw. Bewegungsrichtung; durch passives oder aktives Ordnen realisierbar</p>		
<p>Vibrationswendelförderer (passives Ordnen)</p>	<p>Stufenförderer (passives Ordnen)</p>	<p>Ordnen durch Auslesen (aktives Ordnen)</p>
		
		
		
		

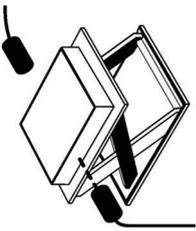
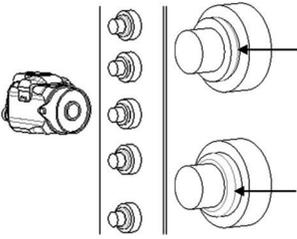
		 		<p>Gleitkanal</p>	<p>Bewegen von Körpern aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position entlang einer definierten Bahn; durch freie Bewegung oder Zwangsführung realisierbar</p>	 <p>Gleitkanal [Hes92]</p>
		 		<p>Linearförderer</p>		 <p>Linearförderer [Sim17]</p>
		 		<p>Transfersystem mit Werkstückträger</p>		 <p>Transfersystem mit Werkstückträger</p>

			
			
			
<p>Förderband</p>	<p>Rollenbahn</p>	<p>Gleitkanal</p>	<p>Innenformschluss</p>
<p>Bewegen von Körpern aus einer beliebigen in eine andere beliebige Position; Beispiele technischer Umsetzung: Führung auf Förderband oder in einem Kanal</p>			<p>Vorübergehendes Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position; durch einen Innen- oder Außenformschluss realisierbar</p>
 <p>Förderband</p>	 <p>Rollenbahn [Har 18]</p>	 <p>Gleitkanal</p>	 <p>Innenformschluss</p>

				<p>Außenform- schluss</p>
				<p>2-Backen-Parallelgreifer</p>
				<p>3-Backen-Zentrischgreifer</p>

 <p>Außenformschluss</p>	 <p>2-Backen-Parallelgreifer [Sch17]</p>	 <p>3-Backen-Zentrischgreifer [Sch17]</p>
<p>Vorübergehendes Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position unter Beteiligung von Kraftschluss; Beispiele technischer Umsetzung: Greifer, wie 2-Backen-Parallelgreifer, Winkelgreifer usw.</p>		

 <p>Elektromagnetgreifer [Sch17]</p>	 <p>Winkelgreifer [Sch17]</p>	 <p>Nadelgreifer [Pif18]</p>	 <p>Vakuumgreifer [Sch17]</p>
<p>Magnetgreifer</p>	<p>Winkelgreifer</p>	<p>Nadelgreifer</p>	<p>Vakuumgreifer</p>
			
			
			

				<p>Erkennung basiert auf Licht</p>	<p>Feststellen, ob Körper in einem definierten Bereich vorhanden sind; realisierbar durch verschiedenen Sensoren, wie optische, induktive, kapazitive oder magnetinduktive Sensoren.</p>	 <p>Anwesenheit prüfen von Platte durch Lichtsensoren [Bal17]</p>
				<p>Erkennung basiert auf Bildern</p>	<p>Feststellen, ob Körper vorgegebene Eigenschaften erfüllt; kann mit nur einem Vision-Sensor durchgeführt werden. Vision-Sensor prüft die Merkmale von Körpern durch Bildvergleiche [Key17].</p>	 <p>In Ordnung Nicht In Ordnung Prüfen der richtigen Montage von Körpern</p>

9.1.4 Parametrische Symbole

Gruppe "Speichern"

Aus verschiedenen Gründen und an verschiedenen Stellen ist das Speichern erforderlich. Zur Auswahl oder Entwicklung eines Speichers müssen bestimmte Anforderungen und Bedingungen beachtet werden, wie Werkstückmerkmale, Kapazität, Positionsgenauigkeit, Ordnungstyp etc. [Hes13]. Die wesentlichen Parameter der Gruppe "Speichern" werden in **Tabelle 9.4** beschrieben. Mit der Funktion "geordnetes Speichern" werden die Orientierung und Position von Werkstück oder Baugruppe definiert. Diese Position und Orientierung werden für nachfolgende Funktionen verwendet, wie z. B. Spannen, Zuteilen, Führen usw.

Gruppe "Mengen verändern"

Beim Verändern von Mengen werden die Positionen, Orientierungen und Anzahl der Werkstücke im Werkstückfluss verändert. Die wesentlichen Parameter des Verzweigens, Zuteilens und Sortierens werden in Tabelle 9.4 dargestellt.

Mit der Funktion "Verzweigen" werden die Startposition (S) und die Richtungen nach der Verteilung (2-1) und (2-2) gegeben. Werkstücke können nach Qualität oder Kapazität verteilt werden, somit werden die Bedingungen zur Verteilung festgelegt.

Durch Funktion "Sortieren" können Werkstücke nach verschiedenen Merkmalen klassifiziert werden, wie z. B. Farbe, Abmessungen, Gewicht. Die Sortierergebnisse werden in zwei oder mehr Sortierbehälter gespeichert. Sortieren ist ein Sonderfall des Verzweigens nach Qualität. Zur Ermittlung der unterschiedlichen Merkmale werden die Werkstücke nach Sortiermerkmale geprüft.

Gruppe "Bewegen"

Beim Bewegen werden die Position und/oder Orientierung eines Werkstücks mit der Zeit verändert. Die wichtigen Parameter der Gruppe "Bewegen" werden Tabelle 9.4 in gezeigt. Die Funktion "Drehen" verändert die Orientierung

des Werkstücks und die Funktion "Schwenken" verändert Beides, die Orientierung und die Position des Werkstücks. Deshalb werden die Startlage und Endlage sowie Winkelabweichung des Werkstücks angegeben.

Mit der Funktion "Verschieben" können sich Werkstücke linear (vertikal, horizontal), eben oder räumlich bewegen. Aus Linearmodulen lässt sich ein Handhabungsgerät auf verschiedene Art und Weise zusammensetzen. Neben der Start- und Endlage des Werkstücks ist der Vertikalhub wichtig für die Auswahl der Funktionsträger, wie Pick & Place, Linear- und Raumportal.

Bei der Funktion "Ordnen" wird ein Werkstück aus einem Haufwerk in eine bestimmte Orientierung und Position gebracht. Die Werkstückmerkmale, wie Form, Abmessungen und Masse beeinflussen das Ordnungsverfahren sowie die Auswahl der Funktionsträger. Diese Werkstückmerkmale werden in der Vorbereitung beschrieben, deshalb werden sie im Symbol nicht hinzugefügt. Neben dem Ordnungstyp, der gewünschten gebrachten Position und Orientierung des Werkstücks wird die Ordnungsleistung angegeben.

Die Funktion "Führen" wird oft als Zwischenspeicher verwendet. Die Start- und Endzeit, Start- und Endposition sowie die Bewegungsbahn prägen den Vorgang "Führen".

Gruppe "Sichern"

Greifer werden im automatisierten Handhabungsprozess für verschiedene Bereiche verwendet. Wegen der Vielfalt der Handhabungsaufgaben und -objekte gibt es zahlreichen unterschiedlichen Greiferbauformen. Bei Greifern sind die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Sicherheit wichtig. Deshalb muss die Greifkraft ermittelt werden. Ein Greifer kann ein oder mehr Werkstücke fassen. Aus diesem Grund wird die Anzahl der gegriffenen Werkstücke im parametrischen Symbol angegeben. Die parametrischen Symbole der Funktion "Spannen" wird in **Tabelle 9.4** gezeigt.

Gruppe "Kontrollieren"

Prüfen legt fest, ob bestimmte Zustände und Eigenschaften des Werkstücks ausgefüllt werden. Deshalb stehen die Prüf- oder Messmerkmale des Werk-

stücks, vorgegebene Toleranz sowie Prüf- oder Messergebnis im parametrischen Symbol zur Verfügung (s. **Tabelle 9.4**). Dieses Ergebnis wird für nachfolgende Funktionen in der Funktionsfolge verwendet. Die Gruppe "Kontrollieren" prüft nicht nur Position und Orientierung des Werkstücks, sondern auch die Falschteile, fehlerhafte Werkstücke, den Zustand der Werkstücke usw. [Hes14].

Tabelle 9.4: Liste der parametrischen Symbole

ungeordnetes Speichern	
Werkstückname:	
Volumen (l):	
Variante:	

geordnetes Speichern	
Werkstück:	
Ordnungstyp:	
n (Stk):	
Rotation (°):	
Variante:	

Zuteilen	
Bedingungen:	
t_Start(s):	
t_Dauer(s):	
n (Stk):	
(S) Px; Py; Pz (mm):	
(E) Px; Py; Pz (mm):	
Rotation (°):	
$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):	
Variante:	
Kosten (€):	

Verzweigen	
Bedingungen:	
t_Start (s):	
t_Dauer (s):	
n (Stk):	
(S) Px; Py; Pz (mm):	
Bedingungen zur Lage (2-1):	
(2-1) Px; Py; Pz(mm):	
Bedingungen zur Lage (2-2):	
(2-2) Px; Py; Pz(mm):	
Variante:	
Kosten (€):	

Verzweigen nach Qualität

Verzweigen 
Bedingungen:
t_Start (s):
Q(Stk/min):
n (Stk):
(S) Px; Py; Pz (mm):
(2-1) Px; Py; Pz(mm):
(2-2) Px; Py; Pz(mm):
Variante:
Kosten (€):

Sortieren 
Bedingungen:
t_Start (s):
Q(Stk/min):
Sortierparameter:
Sortierwerte:
Ausgänge/Behälter:
Variante:
Kosten (€):

Verzweigen nach Kapazität

Drehen 
Bedingungen:
t_Start (s):
t_Dauer (s):
Rotation (°):
$\Delta\phi$ (°):
Variante:
Kosten (€):

Verschieben 
Bedingungen:
t_Start (s):
t_Dauer (s):
(S) Px; Py; Pz (mm):
(E) Px; Py; Pz (mm):
$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):
Variante:
Kosten (€):

Schwenken 
Bedingungen:
t_Start (s):
t_Dauer (s):
(S) Px; Py; Pz (mm):
(E) Px; Py; Pz (mm):
Rotation (°):
$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):
Variante:
Kosten (€):

2D Pick & Place 
Bedingungen:
t_Start (s):
t_Dauer (s):
(S) Px; Py; Pz (mm):
(E) Px; Py; Pz (mm):
Vertikalhub (mm):
$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):
Variante:
Kosten (€):

3D Pick & Place 
Bedingungen:
t_Start (s):
t_Dauer (s):
(S) Px; Py; Pz (mm):
(E) Px; Py; Pz (mm):
Rotation (°):
Vertikalhub (mm):
$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):
Variante:
Kosten (€):

Ordnen 
Bedingungen:
Ordnungstyp:
t_Start (s):
Q(Stk/min):
Rotation (°):
Variante:
Kosten (€):

Führen 
Bedingungen:
t_Start (s):
t_Dauer (s):
(S) Px; Py; Pz (mm):
(E) Px; Py; Pz (mm):
Rotation (°):
$\Delta x; \Delta y; \Delta z$ (mm):
Bewegungsbahn:
Variante:
Kosten (€):

Fördern 
t_Start (s):
t_Dauer (s):
Q(Stk/min):
Empfangsort:
Entladeort:
Förderlänge (mm):
Förderwinkel (°):
Variante:
Kosten (€):

Spannen 
Bedingungen:
t_Start(s):
t_Dauer(s):
Griffstellen am Objekt:
n (Stk):
Greifkraft (N):
Variante:
Kosten (€):

Entspannen 
Bedingungen:
t_Start(s):
t_Dauer(s):
n (Stk):

Halten	
Haltstellen am Objekt:	
Variante:	

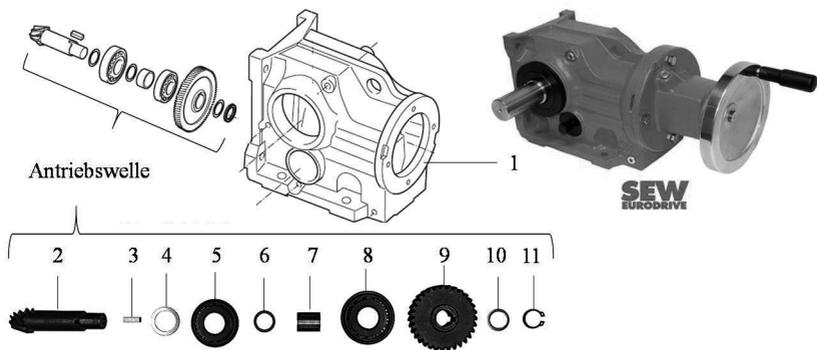
Lösen	
-------	---

Anwesenheit prüfen	
Bedingungen:	
t_Start(s):	
t_Dauer(s):	
Prüfobjekt:	
Erkennungslage:	
Prüfergebnis:	
Variante:	
Kosten:	

Identität prüfen	
Bedingungen:	
t_Start(s):	
t_Dauer(s):	
Prüfobjekt:	
Identitätsmerkmal:	
Toleranz:	
Prüfergebnis:	
Variante:	
Kosten (€):	

9.2 Beispielhafte Konfiguration eines Montagesystems

Das nachfolgend beschriebene Beispiel zeigt eine Lösung für die automatisierte Montage eines Kegelradgetriebes (s. **Abb. 9.3**). Diese ist abhängig von verschiedenen Bedingungen wie z. B. Produktgestaltung, Baugruppenstückzahl und -varianten, Nutzungsdauer usw. In diesem Beispiel wird die Montageplanung für die Antriebswelle des Kegelradgetriebes in Bezug auf die Vorbereitung und Grobplanung unter Einbeziehung der Einsatzmöglichkeiten von Robotern erstellt.



1 Getriebegehäuse; 2 Kegelritzelwelle; 3 Passfeder; 4, 6, 10 Passscheibe; 5, 8; Kegellager mit Innen- und Außenringe; 7 Distanzrohr; 9 Zahnrad; 11 Sicherungsring

Abb. 9.3 Antriebswelle des Kegelradgetriebes [SEW17]

Produktaufbau und Einzelteile: Die Baugruppe „Antriebswelle“ setzt sich aus den Einzelteilen Nr. 2 bis Nr. 11 zusammen und besitzt eine Masse < 500 Gramm. Die wichtigsten Werkstückmerkmale, wie Werkstückverhaltenstyp, Abmessungen, Gewicht, Stoff, Schüttfähigkeit und Formstabilität sind für jedes Teil in **Tabelle 9.5** aufgelistet. Diese Merkmale sind bestimmend für die notwendigen Handhabungsfunktionen sowie die Funktionsträger.

- Im Hinblick auf das automatisierte Ordnen mit einem Vibrationswendelförderer spielt die Schüttfähigkeit eine wichtige Rolle. Teile

mit Schüttfähigkeit lassen sich ohne Beeinflussung der Qualität in Bunkern aufbewahren. Hier besitzen die Teile Nr. 3, 4, 6, 7, 10 und 11 die entsprechende Schüttfähigkeit.

- Die Formstabilität und der Werkstückverhaltenstyp entscheiden über anzusetzende Greifkräfte und Greifpositionen. Die Teile Nr. 4, 6 und 10 würden sich unter den notwendigen Greifkräften verformen.
- Neben den Abmessungen und den Massen prägt der Werkstückverhaltenstyp die Schwierigkeiten des Handhabens. Die Kegelritzelwelle Nr. 2 muss z. B. in das Gehäuse Nr. 1 eingefügt werden. Dafür ist ein Greifen am spiralverzahnten Kegelrad notwendig, was sich jedoch als äußerst schwierig gestaltet.

Tabelle 9.5: Eigenschaften der Bauteile von Antriebswelle

Teil Nr.	Werkstückverhaltenstyp	Abmessungen (in mm)	Stoff	Masse (in Gramm)	Schüttfähigkeit	Formstabilität
1	Block	L = 240; B = 145; H = 185	Stahl	11500	nein	ja
2	Zylinderteile	L = 87, d = 20	Stahl	182	nein	ja
3	Blockteile	L = 16, H = 5, B = 5	Stahl	3,3	ja	ja
4	Flachteile	D = 28, d = 20, Dicks = 0,5	Stahl	1	ja	nein
5, 8	Innenring; Kegelteile; Außenring; Hohlteile	D = 47, d = 20, Gesamtbreite t = 15,25	Stahl	127	nein	ja

6	Flachteile	D = 22, d = 16, Dick s = 0,5	Stahl	0,7	ja	nein
7	Hohlteile	D = 24, d = 20, L = 22	Stahl	26	ja	ja
9	Hohlteile	D = 66, d = 16, L = 9	Stahl	241	nein	ja
10	Flachteile	D = 28, d = 20, Dick s = 1	Stahl	1,4	ja	nein
11	Wirrteile	D = 17,3; d = 16; Dick s = 1	Stahl	0,6	ja	nein

Werkstückanordnung: Basierend auf den Werkstückmerkmalen sind die Teile Nr. 2, 5, 8 und 9 nicht zur Ordnung mit einem VWF geeignet. Sie müssen durch einen Roboter mit Bildverarbeitungssystem oder manuell geordnet werden. Der Sicherungsring Nr. 11 gehört zu den Wirrteilen, weshalb er ebenfalls nicht mit einem VWF geeignet geordnet werden kann und somit in einem Magazin gespeichert werden sollte. Die Teile Nr. 3, 4, 6, 7 und 10 werden durch VWF geordnet.

Montageablaufanalyse: Die Teile Nr. 3 bis Nr. 11 sind mit der Welle Nr. 2 zu montieren. Gemäß dem Aufbau der Antriebswelle können die Fügerangfolgen mittels unterschiedlicher Fügeschritte aufgebaut werden. Im Hinblick auf eine einfache automatisierte Montage werden die Innen- und Außenringe der Kegellager getrennt mit der Welle bzw. dem Gehäuse montiert. Zuerst sind die Außenringe der Lager Nr. 5 und Nr. 8 im Gehäuse Nr. 1 einzusetzen. Anschließend erfolgt die Montage des Innenrings von Lager Nr. 5 und der Teile Nr. 4, 7 und 3 mit der Welle Nr. 2. Danach wird die Welle in das Gehäuse Nr. 1 eingeschoben, gefolgt vom Innenring des Lagers Nr. 8 und den

Teilen Nr. 9, 6 und 10. Abschließend wird mit dem Sicherungsring Nr. 11 die Welle gesichert und die Montage der Baugruppe abgeschlossen (s. **Abb. 9.4**).

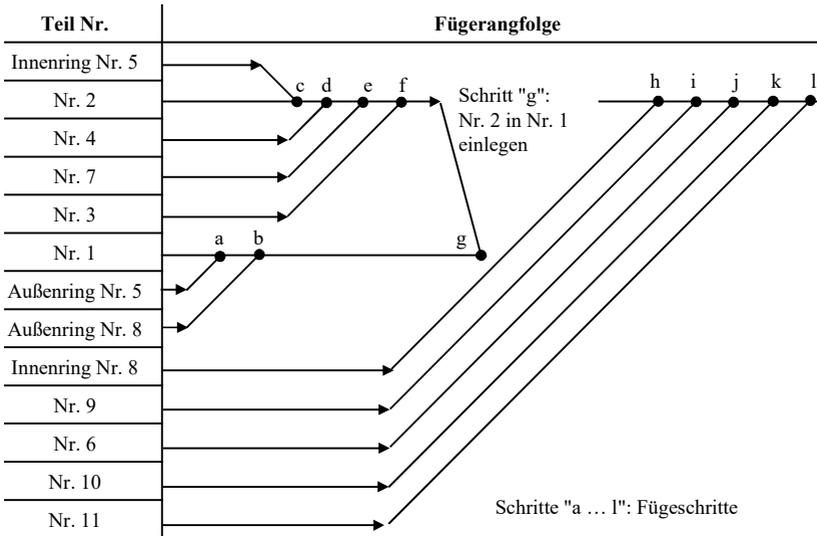


Abb. 9.4: Fügerangfolge zur montierten Antriebswelle mit Gehäuse

Funktionsanalyse: Ein Fügeschritt besteht aus verschiedenen Handhabungsfunktionen wie z. B. Ordnen, Führen oder Prüfen. Die Fügerangfolge in Abb. 9.4 umfasst die unterschiedlichen Fügeschritte von "a" bis "l". Um die Funktionsfolge aufzubauen werden die Handhabungsfunktionen jedes Fügeschrittes analysiert und festgelegt. Z.B wird im Fügeschritt "a" der Außenring Nr. 5 in das Getriebegehäuse Nr. 1 eingesetzt:

- Das Getriebegehäuse ist ein Basisteil und wird durch einen Werkstückträger transportiert. Mit den gegebenen Abmessungen und der Masse (s. Tabelle 9.5) kann es auf einer Ebene oder Schräge sicher stehen bzw. gleiten. Deshalb werden die Getriebegehäuse im Magazin gespeichert und durch ein Rollenband zugeführt. Am Ende des Rollenbands wird ein Getriebegehäuse gegriffen und auf einen

Werkstückträger übergeben. Nachfolgend wird es zur ersten Montagestation geführt.

- Der Außenring Nr. 5 wird in die Lagerbohrung des Gehäuses Nr. 1 eingesetzt. Zuvor sind die Außenringe in einem Magazin gespeichert, wo die durch einen Greifer entnommen werden. Es bieten sich mehrere Möglichkeiten zum sicheren Greifen der Ringe an, z. B. an der Innen-, der Außenkontur oder am Rand des Außenrings. Wegen des geringen Bewegungsspielraums bei der Montage im Gehäuse soll der Außenring am Rand gefasst werden.

Funktionsfolgeaufbau: Auf Basis der Funktionsanalyse werden die Funktionsfolgen für jeden Fügenschritt sowie die Gesamtfunktionsfolge mit Hilfe der Handhabungssymbole aufgebaut. In Hinblick auf eine automatisierte Montage werden die Fügenschritte natürlich auf verschiedene Stationen aufgeteilt. In diesem Beispiel werden erfolgt die Unterteilung anhand der Abmessungen, der Masse, der Geometrie und der Handhabungsschwierigkeiten der Werkstücke. Für das hier gezeigte Beispiel ergibt sich somit eine Gesamtfunktionsfolge nach **Abb. 9.5**.

- Station 1: Die Außenringe der Lager Nr. 5 und Nr. 8 besitzen eine ähnliche Geometrie. Zum Handhaben der Ringe kann nur ein Roboter mit einem speziellen Greifer verwendet werden. Deshalb werden sie in einer gemeinsamen Station montiert.
- Station 2: Der Innenring von Lager Nr. 5 sowie die Teile Nr. 4 und Nr. 7 werden mit der Welle Nr. 2 montiert. Zum Fügen wird die Kegelradwelle in vertikaler Richtung (mit dem spiralverzahnten Kegelrad nach unten) orientiert und fixiert. Die in dieser Station zu montierenden Teile werden durch eine 3-Backengreifer gefasst und auf die Welle von oben aufgeschoben.
- Station 3: Die Passfeder Nr. 3 wird in die Wellennut der Welle Nr. 2 eingelegt. Zum Greifen der Passfeder kann ein 2-Backengreifer oder ein kleiner Vakuumgreifer verwendet werden.

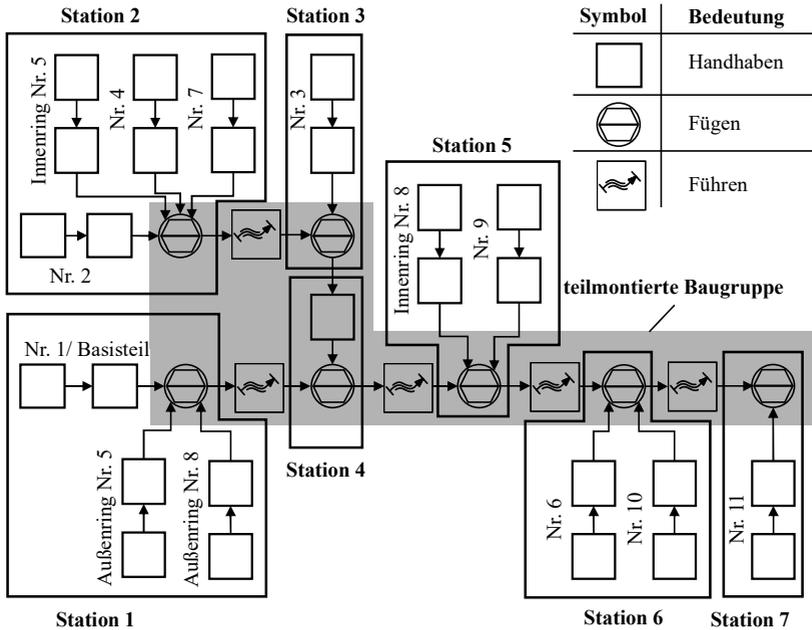


Abb. 9.5: Allgemeine Gesamtfunktionsfolge der Montage der Antriebswelle

- Station 4: Die Baugruppe „Antriebswelle“ wird in die Lagerbohrung des Gehäuses Nr. 1 eingeführt.
- Station 5: In dieser Station werden sowohl der Innenring des Lagers Nr. 8 als auch das Zahnrad Nr. 9 montiert.
- Station 6: Es erfolgt die Montage Passscheiben Nr. 6 und Nr. 10.
- Station 7: Mit dem Sicherungsring Nr. 11 wird die Welle im Gehäuse gesichert.

Abb. 9.5 gibt eine die Übersicht über die Gesamtfunktionsfolge sowie die Aufteilung der Teile Nr. 2 bis Nr. 11 auf die Stationen 1 bis Station 7. Für die

einzelne Beschreibung einer Funktionsfolge können die bekannten Symbole verwendet werden. **Abb. 9.6** zeigt eine Lösung für das Fügen der Außenringe der Lager Nr. 5 und Nr. 8 mit dem Gehäuse Nr. 1. Der Handhabungsablauf wird durch die Funktionsfolge beschrieben. Die Basisteile (Nr. 1) werden in einem Magazin durch ein Rollenband geführt und gespeichert. In diesem Magazin wird ein Teil gegriffen und auf eine Werkstückaufnahme abgelegt. Ein Teil Nr. 1 wird gehalten und zur Station 1 transportiert. Beide Außenringe Nr. 5 und 8 werden in separaten Magazinen gespeichert. In der Station 1 werden sie in Nr. 1 eingefügt. Nach dem Fügen wird die Baugruppe zur Station 2 geführt.

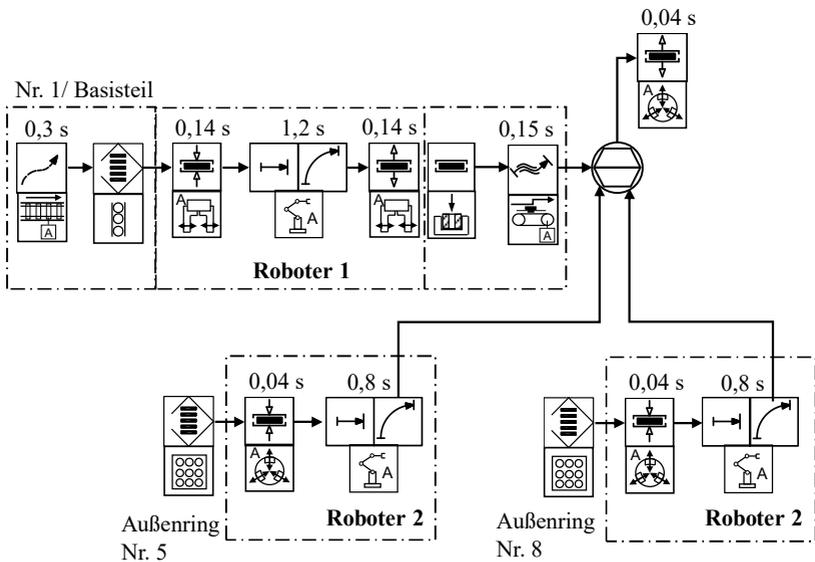


Abb. 9.6: Fügen der Außenringe Nr. 5 und 8 zum Basisteil

Für die weitere Planung der Montage der Antriebswelle muss die Layoutplanung erstellt und die Funktionsträger ausgewählt werden.

9.3 Primale Simplexmethode in vektorieller Form

Die primale Simplexmethode enthält mehrere Iterationen. Eine Iteration umfasst die gesamte Abfolge der einzelnen Schritte. Der Algorithmus des Simplexverfahrens wird in **Abb. 9.7** gezeigt. Im Anschluss erfolgt die Erklärung der Schritte 1 bis 9 ausführlich.

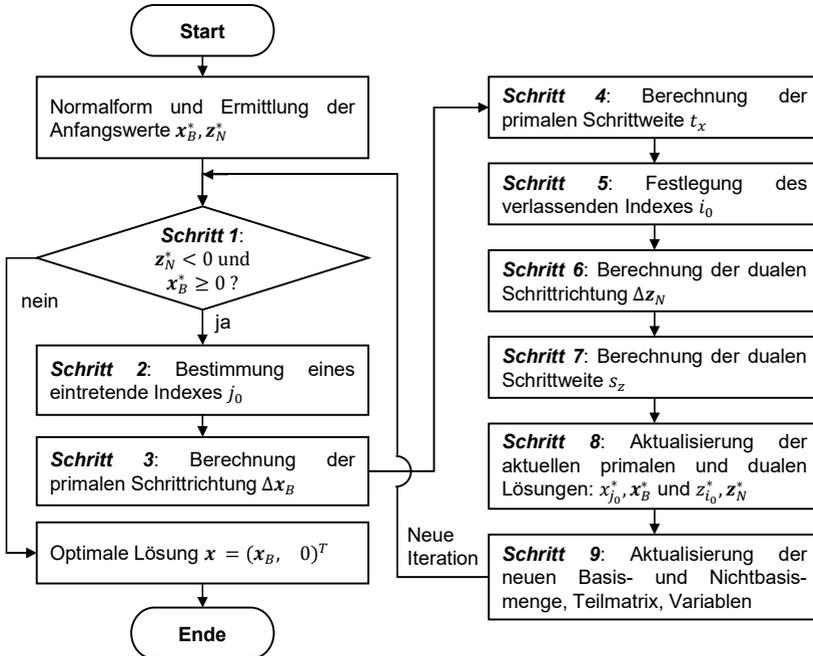


Abb. 9.7: Reihenfolgestufen der primalen Simplexmethode [Van08]

Um ein lineares Optimierungsproblem zu lösen, muss eine Optimierungsaufgabe mit den Standardgleichungen (9.1) und (9.2) formuliert werden [Van08]. Diese Optimierungsaufgabe enthält die gegebenen Daten a_{ij} , b_i , c_j und Entscheidungsvariablen x_j .

$$\min \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \quad (9.1)$$

Die Entscheidungsvariablen geben häufig Dinge vor, welche man anpassen oder kontrollieren kann, z. B. Produktionsmengen in Produktionsplanungsproblemen. Die Nebenbedingungen beschränken die Variablen, um mögliche Lösungen darzustellen.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j &\leq b_i, & i = 1, \dots, m \\ x_j &\geq 0, & j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (9.2)$$

Die nichtnegativen Schlupfvariablen x_{n+i} werden an die Nebenbedingungen (9.2) zugeteilt. Deshalb werden die Nebenbedingungen (9.2) umformuliert (9.3).

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j + x_{n+i} = b_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (9.3)$$

Die nichtnegativen Schlupfvariablen (x_{n+i}) können dem Ende der Liste der Variablen: ($x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m}$) hinzugefügt werden. Deshalb werden die Nebenbedingungen wie folgt ausgedrückt (9.4):

$$x_{n+i} = b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j, \quad i = 1, \dots, m \quad (9.4)$$

$$x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m} \geq 0$$

Die Variablen ($x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m}$) werden in zwei Klassen unterteilt: Basisvariablen und Nichtbasisvariablen. Die Basisvariablen (x_{n+1}, \dots, x_{n+m})

sind die abhängigen Variablen und die Nichtbasisvariablen (x_1, \dots, x_n) sind die unabhängigen Variablen.

Innerhalb jeder Iteration der Simplexmethode geht genau eine Variable von der Nichtbasis zur Basis und genau eine Variable geht von der Basis zur Nichtbasis. Die Variable, die von der Nichtbasis bis Basis geht, wird die eintretende Variable genannt ($j \in \mathcal{N}$). Die Variable, die von der Basis zur Nichtbasis läuft, wird die verlassende Variable genannt ($i \in \mathcal{B}$). Die Mengen \mathcal{B} und \mathcal{N} werden als Basis- und Nichtbasismenge bezeichnet. Am Anfang werden $\mathcal{N} = (1, 2, \dots, n)$ und $\mathcal{B} = (n + 1, n + 2, \dots, n + m)$ beauftragt. Nach der ersten Iteration werden diese Mengen verändert.

Mit den Schlupfvariablen wird ein Optimierungsproblem in einer Matrixform geschrieben:

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

$$\text{unter den Nebenbedingungen: } \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}$$

wobei:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ x_{n+1} \\ \vdots \\ x_{n+m} \end{bmatrix}$$

Die Matrix \mathbf{A} und Vektoren \mathbf{c}, \mathbf{x} werden in Basis und Nichtbasis für den Anfangssatz aufgeteilt:

$$\mathbf{A}_{\mathcal{N}} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}_{\mathcal{N}} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_{\mathcal{N}} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x}_{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} x_{n+1} \\ \vdots \\ x_{n+m} \end{bmatrix}$$

Zur Anwendung der Simplexmethode benötigen wir folgende Anfangsvoraussetzungen:

- Die Basismatrix $\mathbf{A}_{\mathcal{B}}$ ist invertierbar
- Eine zugeordnete aktuelle primale Lösung ist zulässig $\mathbf{x}_{\mathcal{B}}^* \geq \mathbf{0}$
- Eine zugeordnete aktuelle duale Lösung $\mathbf{z}_{\mathcal{N}}^*$ ist zulässig $\mathbf{z}_{\mathcal{N}}^* < \mathbf{0}$

Im **Schritt 1** wird die Optimalität geprüft. Die Zulässigkeiten für Simplexverfahren sind $\mathbf{x}_{\mathcal{B}}^* \geq \mathbf{0}, \mathbf{z}_{\mathcal{N}}^* < \mathbf{0}$. Hat $\mathbf{z}_{\mathcal{N}}^*$ keine negative Komponente, ist die aktuelle Lösung optimal. Deswegen ist das Verfahren beendet und die optimale Lösung ist $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_{\mathcal{B}}^*, \mathbf{0})^T$. Sonst läuft das Verfahren zum Schritt 2.

Schritt 2 bestimmt den eintretenden Index $j_0 \in \mathcal{N}$. Ausgehend von $\mathbf{z}_{\mathcal{N}}^*$ wird die negativsten Komponente $z_{j_0}^*$ ausgewählt. Das j_0 ist der eintretende Index und die Variable $z_{j_0}^*$ ist die eintretende Variable.

Im **Schritt 3** wird die primale Schrittrichtung $\Delta \mathbf{x}_{\mathcal{B}}$ berechnet. Die Schrittrichtung für die primale Basisvariablen ist gegeben (9.5):

$$\Delta \mathbf{x}_{\mathcal{B}} = \mathbf{A}_{\mathcal{B}}^{-1} \mathbf{A}_{\mathcal{N}} \mathbf{e}_{j_0} \quad (9.5)$$

e_{j_0} ist ein Einheitsvektor und hat die Werte 0 für alle Komponenten außer dem Wert 1 an der Position des j -ten Index. Der Einheitsvektor e_{j_0} umfasst n -Zeilen und 1-Spalte: $e_{j_0} = (0 \ 0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0)_{n \times 1}^T$.

Im **Schritt 4** findet die Berechnung für die primale Schrittweite t_x statt. Die größte Schrittweite $t_x > 0$ für alle Komponenten von \mathbf{x}_B nichtnegativ wird ausgewählt. Die Schrittweite ist durch die Gleichung (9.6) festgelegt.

$$t_x = \left(\max_{i \in \mathcal{B}} \frac{\Delta x_i}{\mathbf{x}_i^*} \right)^{-1}, \quad \forall i \in \mathcal{B} \quad (9.6)$$

Im **Schritt 5** wird der verlassende Index bestimmt. Die verlassende Variable wird durch aus einer Variablen $x_i, i \in \mathcal{B}$ in der Gleichung (9.6) gewählt, womit das Maximum in der Berechnung von t erhalten wird. Die Position i_0 in der Basismenge \mathcal{B} ist der verlassende Index.

Im **Schritt 6** erfolgt die Berechnung der dualen Schrittrichtung $\Delta \mathbf{z}_{\mathcal{N}}$. Es ist wesentlich zu erklären, wie $Z_{\mathcal{N}}^*$ ändert. Es ist leicht, um die duale Gleichung zu betrachten. In dieser dualen Gleichung ist z_i die eintretende Variable. Die duale Schrittrichtung $\Delta \mathbf{z}_{\mathcal{N}}$ ist berechnet (9.7):

$$\Delta \mathbf{z}_{\mathcal{N}} = -(\mathbf{A}_{\mathcal{B}}^{-1} \mathbf{A}_{\mathcal{N}})^T \mathbf{e}_{i_0} \quad (9.7)$$

Im **Schritt 7** wird die duale Schrittweite s_z berechnet. Die eintretenden Index j_0 und eintretende Variable $z_{j_0}^*$ wurden im Schritt 2 festgelegt. Daher kann die duale Schrittweite s_z berechnet werden (9.8):

$$s_z = \frac{z_{j_0}^*}{\Delta z_{j_0}}, \quad \text{mit } j_0 \in \mathcal{N} \quad (9.8)$$

Im **Schritt 8** werden die aktuellen primalen und dualen Lösungen aktualisiert (9.9):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}_{j_0}^* &:= t_x; \quad \mathbf{x}_B^* := \mathbf{x}_B^* - t_x \Delta \mathbf{x}_B \\
 \mathbf{z}_{i_0}^* &:= s_z; \quad \mathbf{z}_N^* := \mathbf{z}_N^* - s_z \Delta \mathbf{z}_N
 \end{aligned}
 \tag{9.9}$$

Im **Schritt 9** werden die Positionen von neuen Basis- und Nichtbasismengen sowie die neuen Untermatrix, Variablen aktualisiert. Die Positionen der verlassenden und eintretenden Variable wird zwischen der Basis- und Nichtbasismenge ausgetauscht (9.10).

$$\begin{aligned}
 \mathcal{B} &:= \mathcal{B} \setminus \{i_0\} \cup \{j_0\} \\
 \mathcal{N} &:= \mathcal{N} \setminus \{j_0\} \cup \{i_0\}
 \end{aligned}
 \tag{9.10}$$

Die neuen Untermatrizen $\mathbf{A}_B, \mathbf{A}_N$ werden ausgetauscht, wobei die $\mathbf{A}_B^{i_0}, \mathbf{A}_N^{j_0}$ als die i_0, j_0 -ten Spalte von Untermatrix $\mathbf{A}_B, \mathbf{A}_N$ bezeichnen (9.11).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_B &:= \mathbf{A}_B \setminus \{\mathbf{A}_B^{i_0}\} \cup \{\mathbf{A}_N^{j_0}\} \\
 \mathbf{A}_N &:= \mathbf{A}_N \setminus \{\mathbf{A}_N^{j_0}\} \cup \{\mathbf{A}_B^{i_0}\}
 \end{aligned}
 \tag{9.11}$$

Die neuen Variablen $\mathbf{x}_B^*, \mathbf{z}_N^*$ werden aktualisiert (9.12).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}_B^* &:= \mathbf{x}_B^* \setminus \{\mathbf{x}_{i_0}^*\} \cup \{\mathbf{x}_{j_0}^*\} \\
 \mathbf{z}_N^* &:= \mathbf{z}_N^* \setminus \{\mathbf{z}_{j_0}^*\} \cup \{\mathbf{z}_{i_0}^*\}
 \end{aligned}
 \tag{9.12}$$

9.4 Berechnung der Verfahzeiten

Pneumatische, hydraulische Linearmodule

Die Bewegungszeit eines Kolbenstangenzyinders hängt auch von der Aufbauast ab. Die mittlere Kolbengeschwindigkeit v_m hängt von der Nutzlast m ab und wird aus dem Hub s und der Verfahzeit t berechnet. Die Verfahzeit und Beschleunigung werden wie folgt ermittelt [Bra14].

$$t = \frac{s}{v_m}, \quad a = \frac{2 \cdot s}{t^2} \quad (9.13)$$

Die Verfahzeit ist die Bewegungszeit des Kolbens von einer Endlage in eine andere Endlage. Bei minimaler Verfahzeit eines Linearmoduls darf die Konstruktion der Anlage nicht zerstört werden [Sch17].

Die mittlere Kolbengeschwindigkeit von pneumatischen Zylindern hängt von Anwendungsbedingungen, wie Gegenkraft, Luftdruck, Rohrlänge, Rohrdurchmesser, Kolbendurchmesser, Endlagendämpfung usw. ab. [Cro03]. In dem Katalog für pneumatische Linearmodule mit Kolbenstangenzyinder sind die mittleren Kolbengeschwindigkeiten abhängig von Nutzlasten sowie Hüben dokumentiert. Mit den vorgegebenen Hüben, Nutzlasten, usw. werden die Verfahzeiten aus den Produktkatalogen ermittelt [Kön17], [Sch17]. In der Grobplanung werden die mittleren Kolbengeschwindigkeiten vorgegeben, somit werden die Bewegungszeiten berechnet. **Tabelle 9.6** zeigt ein Beispiel für die mittleren Kolbengeschwindigkeiten mit der Nutzlast von 2 kg.

Tabelle 9.6: Beispielhafte Mittlere Geschwindigkeit von pneumatischen Linearmodulen

Hub [mm]	v_m [m/s]	Hub [mm]	v_m [m/s]
50	0,23-0,45	100	0,5-0,71
150	0,57-0,68	200	0,6-0,74
250	0,625-0,78	400	0,65-0,81

Elektrische Linearachse

Im Montagesystem wird eine Anlagenkomponente aus der Ruhelage beschleunigt. Nach dem Erreichen der maximalen Geschwindigkeit behält sie diese konstant bei. Dann wird die Anlagenkomponente bis zur Ruhe verzögert [Bög15]. Die Werte für Beschleunigung und Geschwindigkeit dürfen nicht die maximal zulässigen Werte überschreiten, um die Anlagenkomponente zu schützen. Für ein Linearmodul lassen sich Bewegungsprofile nach 3/3 Trapez- oder ein Dreieckverlauf auswählen (s. **Abb. 9.8**) [Rex17], [Sch17]. Mit 3/3 Trapez wird die Leistung minimiert, mit Dreiecksverläufen lassen die Beschleunigung und Ausführungszeit minimieren [Bra14].

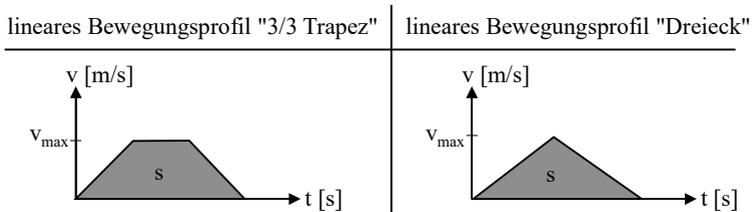


Abb. 9.8: Diagramm der linearen Bewegungsprofile [Bra14]

Um die Bewegungszeit t für typische lineare Bewegungsprofile "3/3 Trapez" und "Dreieck" zu erreichen, muss der Weg s mit maximaler Geschwindigkeit v_{max} [m/s] oder Beschleunigung a_{max} [m/s²] zurückgelegt werden. Im Katalog werden die zulässige Geschwindigkeit [v] und Beschleunigung [a] gegeben. Basierend auf den v_{max} , a_{max} und Anforderungsparametern, wie Abmessungen, Eigenmasse etc. werden die geeigneten Anlagenkomponenten ausgewählt. Die Bewegungszeiten t_v [s] und t_a [s] gemäß der v_{max} und a_{max} werden ermittelt [Bra14]:

- Für das typische lineare Bewegungsprofil "3/3 Trapez" gilt:

$$t_v = 1,5 \cdot \frac{s}{v_{max}}, \quad t_a = 2,12 \cdot \sqrt{\frac{s}{a_{max}}} \quad (9.14)$$

$$t = \begin{cases} t_v, & \text{wenn } t_v \geq t_a \\ t_a, & \text{sonst} \end{cases}$$

- Für das typische lineare Bewegungsprofil "Dreieck" gilt:

$$t_v = 2 \cdot \frac{s}{v_{max}}, \quad t_a = 2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a_{max}}} \quad (9.15)$$

$$t = \begin{cases} t_v, & \text{wenn } t_v \geq t_a \\ t_a, & \text{sonst} \end{cases}$$

Um die Verfährzeit der elektrischen Linearachsen (Spindel-, Zahnriemen-, Zahnstangen- und Direktantrieb) zu berechnen, müssen maximale Geschwindigkeit v_{max} und Beschleunigung a_{max} gegeben werden. Die v_{max} und a_{max} der Linearachsen hängen auch von der Nutzlast, dem Hub, der Wiederholgenauigkeit, der Antriebskraft usw. ab. In den Katalogen von Schunk [Sch17] zu elektrischen Linearachsen zeigen die Diagramme die durchschnittliche Verfährzeit bei konstanter maximaler Nutzlast. Ausgehend von der Verfährzeit t und dem Weg s für Linearachsen mit Direktantrieb (Linearachse) werden die v_{max} und a_{max} berechnet (s. **Tabelle 9.7**). Basierend auf der Tabelle 9.7 werden die Verfährzeiten der elektrischen Linearachsen nach dem Weg s und der Nutzlast von 2 kg in der Grobplanung ermittelt.

Tabelle 9.7: Beispielhafte max. Geschwindigkeit und Beschleunigung der Linearachsen

Hub [mm]	v_{max} [m /s]	a_{max} [m /s ²]	Hub [mm]	v_{max} [m /s]	a_{max} [m /s ²]
50	1-1,25	20-31,25	100	1,4-1,8	21-33
150	1,66	18,5	200	1,9	18,1
250	2	16	400	2,7-3,8	18-36

Rundscharttisch

Ein Schrittgetriebe ist ein fortlaufendes Übertragungsgetriebe, welches eine konstante Antriebsbewegung in eine Schrittbewegung umgewandelt. Im Maschinen- und Gerätebau werden Schrittgetriebe in verschiedenen Bereichen verwendet, besonders zur Erstellung von schrittweisen Transportbewegungen. Zum Beispiel finden die Schrittbewegungen von Rundtaktischen vielfältige Anwendung in Verarbeitungs- oder Montagemaschinen [Vol87].

Beim Rundscharttisch wird eine kontinuierliche Antriebsbewegung mit Antriebswinkel in eine Schrittbewegung mit Abtriebswinkel umgewandelt. Die Bewegungsperiode des Rundscharttisches umfasst einen Schaltwinkel φ_S und einen Rastwinkel φ_R . Das Verhältnis zwischen dem Rastwinkel φ_R und Bewegungsperiode $\varphi_R / (\varphi_R + \varphi_S)$ bezeichnet man als Rast-Perioden-Verhältnis [Hei15]. Für einen bestimmten Rundscharttisch ist dieses Rast-Perioden-Verhältnis konstant und fest. Beim automatischen Montagesystem wird ein Rundscharttisch programmierbar getaktet. Um die Taktzeit des Rundscharttisches zu ändern, wird die Drehgeschwindigkeit der Antriebswelle in der Rastphase gesteuert. Mit einer geeigneten Steuerung wird die Rastzeit t_R im Takt verändert (s. **Abb. 9.9**). Ausgehend von der Schrittzeit t_S und den technischen Anforderungsdaten lassen sich geeignete Rundscharttische in den Katalogen auswählen.

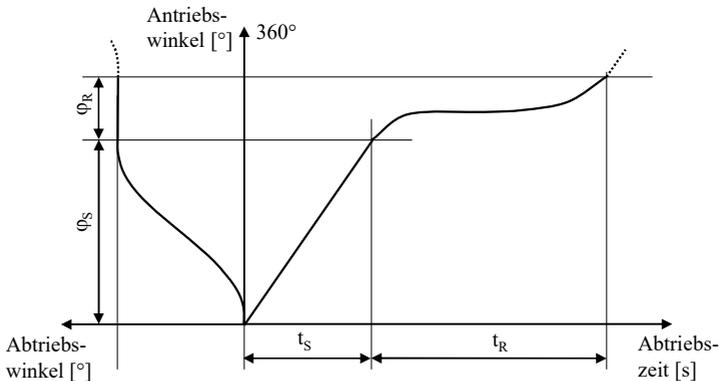


Abb. 9.9: Veränderung der Rastzeit durch elektrische Steuerung

9.5 Erstellung der Funktionsfolgen von Station 2 bis Station 5

9.5.1 Station 2: Einsetzhandling für Chip

Basierend auf der Handhabungsaufgabe der Station 2 wird die Funktionsfolge in **Abb. 9.10** erstellt. Die Nummer der Funktionsträger sowie Ausführungszeiten werden in **Tabelle 9.8** gezeigt. Die Chips sind ungeordnet in einem Vibrationswendelförderer gespeichert. Der Vibrationswendelförderer ordnet die Chips soweit, dass sie einzeln auf einem Linearförderer in Richtung der Montagestationen des Rundtaktautomaten gleiten können.

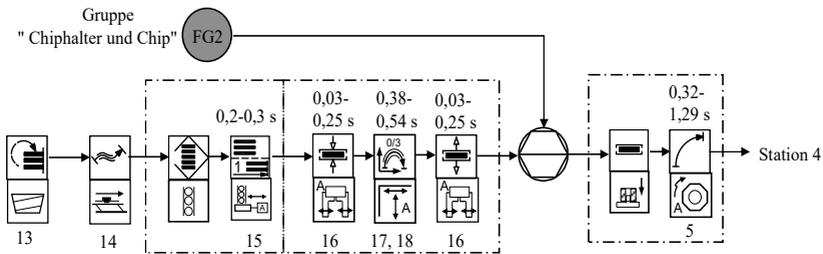


Abb. 9.10: Funktionsfolge der Station 2

Am Ende der Schiene wird ein Chip auf einem Horizontalschlitten mit einem Hub von 200 mm zugeteilt, damit ein Greifer den Chip zur Montage in Station 2 übernehmen kann. Vor der Montage wird ein Zylinder mit einem Hub von 100 mm ausgefahren und die Chiphalter in der Werkstückaufnahme gespannt. Danach wird der Chiphalter durch Einfahren des Zylinders wieder entspannt. Der Greifer wird durch einen Horizontalschlitten mit einem Hub von 150 mm und einem Vertikalschlitten mit einem Hub von 50 mm bewegt. Nach dem der Chip in den Chiphalter eingefügt wurde, wird der Chiphalter entspannt und die Baugruppe "Chiphalter und Chip" zur Fügeposition (**FG2**) an der Station 3 rotiert.

In die Station 2 wird ein 2-Backen-Parallelgreifer verwendet. Die Schließ- und Öffnungszeit lassen sich im Produktkatalog finden. Die Ausführungszeiten der Schlitten und Greifer werden in Tabelle 9.8 dargestellt.

Tabelle 9.8: geschätzte Ausführungszeiten auf Station 2

Nr.	Funktion	Parameter	geschätzte Zeit	
			Pneumatik	Elektrik
6	Chiphalter spannen	Hub = 100 mm	t = 0,2 s	t = 0,14 s
7	Chip ordnen	Volumen 0,75 - 1,5 Liter		
8	Chip, Buchse führen	Wege = 400 mm		
9	Chip zuteilen	Hub = 200 mm	t = 0,33 s	t = 0,21 s
10	Chip spannen und entspannen	Parallelgreifer	t = 0,03 s	t = 0,25 s
11	Chip Vertikalschlitten	Hub = 50 mm	t = 0,14 s	t = 0,1 s
12	Chip Horizontalschlitten	Hub = 150 mm	t = 0,26 s	t = 0,18 s

Aus der Funktionsfolge kann die Station 2 gestaltet werden (s. **Abb. 9.11**). Über eine Vibrationsschiene auf Stützen, die aus Gleitschiene und U-förmigen Vibrationsmagneten besteht, rutschen diese schließlich zum Rundschalttisch. Vibrationswendelförderer und Vibrationsschiene befinden sich auf einem externen, mit dem Rundschalttisch verbundenen Gestell.

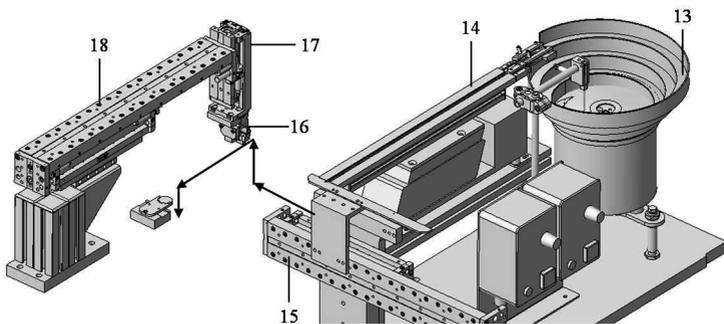


Abb. 9.11: Beispiel für eine Gestaltung der Station 2

9.5.2 Station 3: Einsetzhandling für Buchse

Die Buchsen sind ungeordnet in einem Vibrationswendelförderer gespeichert. Der Vibrationswendelförderer ordnet die Buchsen soweit, dass sie einzeln auf einer Linearschwingförderer in Richtung der Montagestationen des Rundtaktautomaten gleiten können. Am Ende der Schiene wird eine Buchse auf einem Horizontalschlitten mit einem Hub von 175 mm zugeteilt, damit ein Greifer die Buchse zur Montage übernehmen kann. Der Greifer wird durch einen Horizontalschlitten mit einem Hub von 150 mm und einem Vertikalschlitten mit einem Hub von 50 mm bewegt. Für die Handhabungsaufgabe in dieser Station wird die Funktionsfolge in **Abb. 9.12** gezeigt.

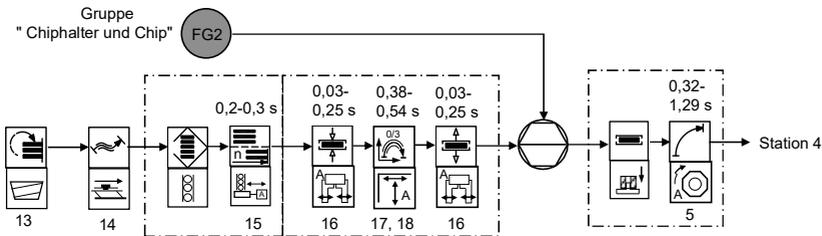


Abb. 9.12: Funktionsfolge der Station 3

Zur Realisierung der Handhabungsaufgaben werden 2-Backen-Parallelgreifer und Linearmodule- oder -achse eingesetzt. Die geschätzten Ausführungszeiten werden in **Tabelle 9.9** vorgezeigt.

Aus der Funktionsfolge lässt sich die Station 3 entwerfen. Die Buchsen sind ungeordnet gespeichert. Die erste aktive Bewegung bei der Zuführung der Buchsen führt ein doppelt wirkendes Linearmodul aus, das die einzelne Buchse in einer Vorrichtung auffängt und sie in eine vorgegebene Position verfährt. Aus dieser Position nimmt ein Greifer die Buchse, um sie anschließend in den Chiphalter einzusetzen. Die Bewegungen für die Positionierung des Greifers werden durch einen Horizontal- und einen Vertikalschlitten realisiert. Die Linearschlitten sind an stehenden Aluminiumprofilen und Zwischenplatten befestigt um die erforderliche Position zu gewährleisten (s. **Abb. 9.13**).

Tabelle 9.9: geschätzte Ausführungszeiten auf Station 3

Nr.	Funktion	Parameter	geschätzte Zeit	
			Pneumatik	Elektrik
13	Buchse ordnen	Volumen 0,75 - 1,5 Liter		
14	Buchse führen	Wege = 400 mm		
15	Buchse zuteilen	Hub = 175 mm	t = 0,3 s	t = 0,2 s
16	Buchse spannen und entspannen	Parallelgreifer	t = 0,03 s	t = 0,25 s
17	Buchse Vertikal-schlitten	Hub = 50 mm	t = 0,14 s	t = 0,1 s
18	Buchse Horizontal-schlitten	Hub = 150 mm	t = 0,26 s	t = 0,18 s

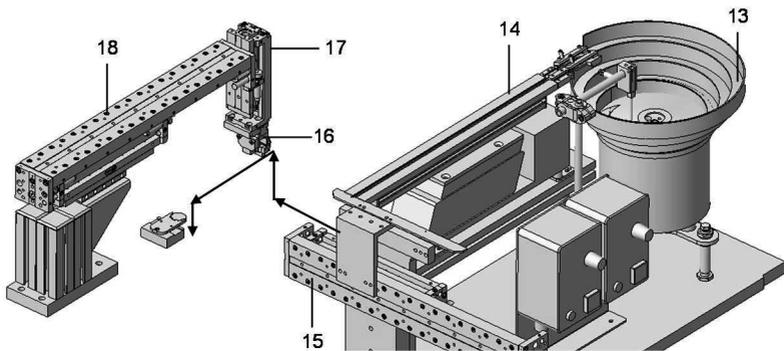


Abb. 9.13: Beispiel für eine Gestaltung der Station 3

9.5.3 Station 4: Prüfvorrichtung

Die Station 4 ist eine mechanische Kontrollstation. **Abb. 9.14** stellt den Kontrollprozess dar. Es wird überprüft, ob der Chip in die Chiphalter montiert wurde.

Das Gestell wird durch eine Grundplatte, Aluminiumprofilen und Zwischenplatten gebildet. Ein Vertikalschlitten mit einem Hub von 100 mm, der am Gestell befestigt ist, bewegt eine Prüfvorrichtung nach unten auf die Baugruppe. Zuerst fixiert ein hinten an der Prüfvorrichtung angebrachter Niederhalter die Chiphalterung. Danach senkt sich ein Taststempel auf den Chip. Ist der Chip montiert, so wird eine weitere Bewegung des Stempels verhindert, obwohl sich der Schlitten noch weiter nach unten bewegt. Die dabei auftretende relative Verschiebung des Taststempels zur restlichen Prüfvorrichtung wird durch eine Lichtschranke circa 0,5 - 5 ms detektiert. Das Prüfergebn ist das sogenannte EAP und es wird zur Station 5 gesendet. Zum Schluss lösen sich Taststempel und Niederhalter wieder.

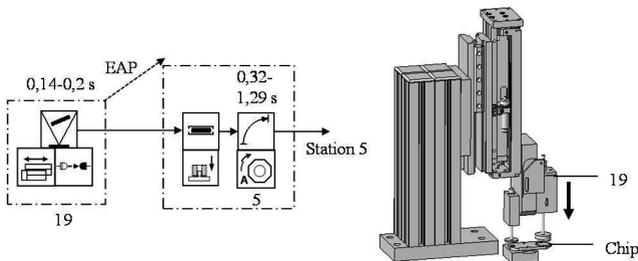


Abb. 9.14: Funktionsfolge und ein Beispiel für eine Gestaltung der Station 4

9.5.4 Station 5: Auswurfstation

Die Station 5 entfernt die gefertigten montierten Chiphalter, Chip und Buchse aus der Werkstückaufnahme. Ein Greifer übernimmt dabei die Baugruppe und übergibt sie an den Chipauswurf. Ausgehend von dem Prüfergebn in der Station 5 "EAP" wird eine Baugruppe klassifiziert: in Ordnung und nicht in Ordnung. Daher wird die Baugruppe in zwei Bunker befördert. Die Bewegungen werden durch einen Horizontalschlitten mit einem Hub von 400 mm

und einem Vertikalschlitten mit einem Hub von 50 mm realisiert. Mit der Beschreibung für die Station 5 wird die Funktionsfolge in **Abb. 9.15** erstellt.

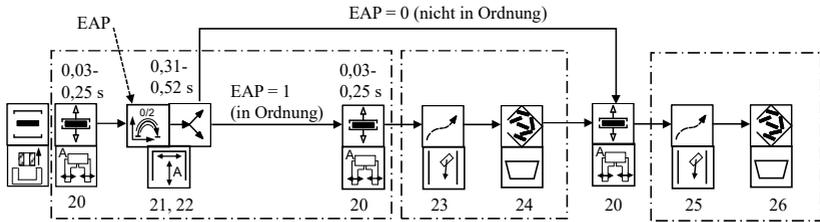


Abb. 9.15: Funktionsfolge der Station 5

In Station 5 werden die montierten Chiphalter klassifiziert und entnommen. Deshalb muss eine Servopneumatik- oder eine Linearachse eingesetzt werden. Die Ausführungszeiten dieser Hübe werden in **Tabelle 9.10** gezeigt.

Tabelle 9.10: geschätzte Ausführungszeiten auf Station 5

Nr.	Funktion	Parameter	geschätzte Zeit	
			Pneumatik	Elektrik
20	Baugruppe spannen und entspannen	Parallelgreifer	$t = 0,03$ s	$t = 0,25$ s
21	Baugruppe Vertikalschlitten	Hub = 50 mm	$t = 0,14$ s	$t = 0,1$ s
22	Baugruppe Horizontalschlitten	Hub = 400 mm	$t = 0,38$ s	$t = 0,21 - 0,295$ s
23, 24	Baugruppen ausführen	Führungsrinne: B = 35 mm, L = 500 mm		
25, 26	Baugruppen speichern	Volumen 2 Liter		

Basierend auf der Funktionsfolge lässt sich die Station 5 skizzieren. Am Ende des Demonstrationsprozesses entfernt die Station 5 die Chiphalterung aus der Vorrichtung. Dabei werden beide von einem Greifer aufgenommen und zum Chiphalterauswurf transportiert. Die Bewegungen werden durch einen Horizontal- und einen Vertikalschlitten an einer Chiphalterung aus einer Grundplatte, Säulenaufbausystem und einer Winkelkonstruktion sowie Schlitten erzeugt (s. **Abb. 9.16**).

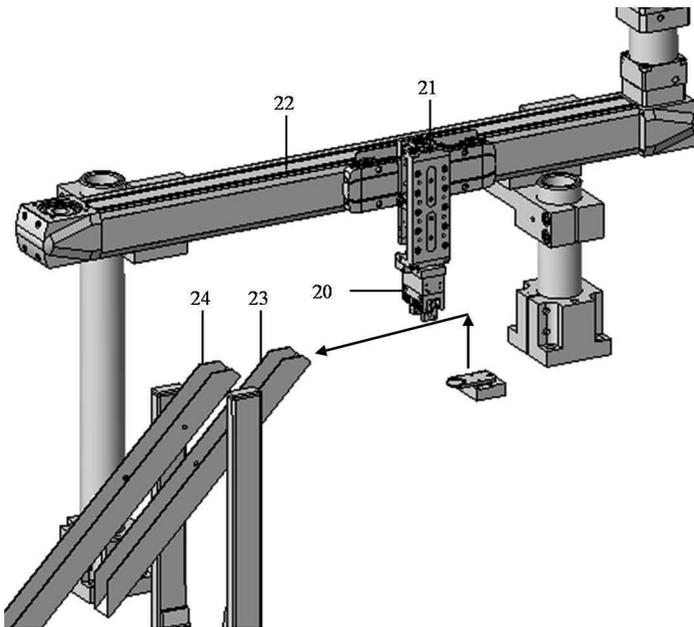


Abb. 9.16: Beispiel für eine Gestaltung der Station 5

9.6 Funktionsträger des Rundtaktautomaten

9.6.1 Datenbank der Station 1

Zuteilen: Der Antrieb der Funktion "Zuteilen" wird durch ein Linearmodul realisiert. Das Linearmodul hat einen Hub von 200 mm, die Nutzmasse von 1,4 kg und die Antriebskraft ab 4,1 N. Die Varianten werden in **Tabelle 9.11** gezeigt.

Tabelle 9.11: Linearmodule für Chiphalter zuteilen [Sch17], [Zim17], [Nor17], [Dom17]

Menge "ZTCT"	Anbieter	An- triebsart	Ausfahr- zeit [s]	Einfahr- zeit [s]	Kosten [€]
LM 100- H200	Schunk	Pneu- matik	0,32	0,32	800
LM 200- H200	Schunk	Pneu- matik	0,27	0,27	900
KLM 100- H200	Schunk	Pneu- matik	0,31	0,31	950
LM 8-F4- 240	Domino	Pneu- matik	0,38	0,38	700
LSX25-200	Zimmer- gruppe	Pneu- matik	0,28	0,28	850
20036-6200	Norelem	Pneu- matik	0,475	0,475	650
ELP100- H200	Schunk	Elektrik	0,35	0,35	1200
ELM 37- H260	Schunk	Elektrik	0,21	0,21	1500

Spannen: Die Chiphalter werden durch einen Greifer gefasst. Die Anforderungen an einem Greifer sind: Greifkraft = 3N; Abstand zwischen Grundbacken: 30-40 mm; Greifertyp: Parallelgreifer; Hub pro Backe: bis 8 mm. Die Greifvarianten werden in **Tabelle 9.12** dargestellt.

Tabelle 9.12: Greifer für Chiphalter spannen [Sch17], [Fes17], [SMC17]

Menge "GFCT"	Anbieter	Antriebsart	Gewicht [kg]	Schließzeit [s]	Öffnungszeit [s]	Kosten [€]
MPG-50	Schunk	Pneumatik	0,35	0,035	0,035	550
MPG-plus 50	Schunk	Pneumatik	0,31	0,04	0,04	500
MPG-plus 64	Schunk	Pneumatik	0,53	0,045	0,045	450
EGP 50-N-N-B	Schunk	Elektrik	0,51	0,21	0,21	600
RH 925	Schunk	Elektrik	0,55	0,5	0,5	700
DHPS 16-A	Festo	Pneumatik	0,18	0,1	0,1	400
MHQG2-25	SMC	Pneumatik	0,625	0,17	0,17	350

Vertikalverschieben: Der Antrieb der Funktion "Vertikalverschieben" erfolgt durch ein Linearmodul. Das Linearmodul hat einen Hub von 50 mm, die Nutzmasse von 0,5 kg und die Antriebskraft ab 9 N. Die Varianten werden in **Tabelle 9.13** gezeigt.

Tabelle 9.13: Linearmodule für Chiphalter Vertikalverschieben [Dom17], [Sch17], [Zim17], [Afa17], [Nor17]

Menge "VSCT"	Anbieter	An- triebs- art	Ge- wicht [kg]	Aus- fahrzeit [s]	Ein- fahr- zeit [s]	Kos- ten [€]
LM 4 S060	Domino	Pneu- matik	0,8	0,2	0,2	480
LM100 - H50	Schunk	Pneu- matik	2,6	0,15	0,15	640
LSF25-50	Zimmer- gruppe	Pneu- matik	1	0,12	0,12	750
LM 25- H059	Schunk	Pneu- matik	0,6	0,17	0,17	550
LM 50- H50	Schunk	Pneu- matik	1,06	0,15	0,15	610
KLM 25- H059	Schunk	Pneu- matik	0,66	0,17	0,17	570
KLM 50- H50	Schunk	Pneu- matik	1,5	0,13	0,13	700
CLM 25- H059	Schunk	Pneu- matik	0,6	0,17	0,17	580
CLM 50- H50	Schunk	Pneu- matik	0,98	0,15	0,15	600
LSX25-50	Zimmer- gruppe	Pneu- matik	1	0,25	0,25	450
LM 20/60	Afag	Pneu- matik	1,55	0,18	0,18	500
LM 25/60	Afag	Pneu- matik	1,965	0,14	0,14	650

20034-4060	Norelem	Pneumatik	0,74	0,38	0,38	400
20032-4065	Norelem	Pneumatik	0,3	0,42	0,42	350
ELP25-H050	Schunk	Elektrik	1,8	0,15	0,15	620
ELM23-H070	Schunk	Elektrik	1,5	0,1	0,1	1450
ELB70-H050	Schunk	Elektrik	2	0,8	0,8	1000

Horizontalverschieben: der Antrieb der Funktion "Horizontalverschieben" erfolgt durch ein Linearmodul. Das Linearmodul hat einen Hub von 200 mm, die Nutzmasse von 2 kg und die Antriebskraft ab 7,7 N. Die Varianten werden in **Tabelle 9.14** beschrieben.

Tabelle 9.14: Linearmodule für Chiphalter Horizontalverschieben [Fes17], [Afa17], [Zim17]

Menge "HSCT"	Anbieter	Antriebsart	Ausfahrzeit [s]	Einfahrzeit [s]	Kosten [€]
HMP-16-200	Festo	Pneumatik	0,38	0,38	800
LM 20/200	Afag	Pneumatik	0,37	0,37	850
LM100-H200	Schunk	Pneumatik	0,33	0,33	950
LSX25-200	Zimmergruppe	Pneumatik	0,3	0,3	1000

LM200-H200	Schunk	Pneumatik	0,3	0,3	1150
KLM200-H200	Schunk	Pneumatik	0,26	0,26	1100
ELP100-H200	Schunk	Elektrik	0,35	0,35	900
ELM 37-H260	Schunk	Elektrik	0,21	0,21	1500

Rundschalttisch: Die Chiphalter, Chips und Buchsen werden von einer Station bis anderer Station durch einen Rundschalttisch transportiert. Die Anforderungen des Rundschalttisches sind: Drehwinkel 45°; Massenträgheitsmoment 8,75 kgm²; Aufbauplattengröße: 1100 mm. Die Varianten des Rundschalttisches werden in **Tabelle 9.15** gezeigt.

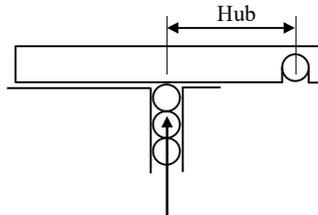
Tabelle 9.15: Rundschalttische [Tak17], [Hei17], [Wei17]

Menge "RST"	Anbieter	Drehzeit [s]	Kosten [€]
RT1600	Taktomat	0,48	5500
RT200	Taktomat	0,32	7500
TC220T	Weiss	0,54	4500
TC320T	Weiss	0,36	7000
H1200-16/2-H100-270	Heinz	0,5	5200
H1200-16/2-H100-240	Heinz	0,44	6120
H1200-16/2-H100-210	Heinz	0,39	6500
HTT-80-8-300	Heinz	0,55	4200
HTT-80-8-270	Heinz	0,5	5000
HTT-80-8-240	Heinz	0,44	6000

9.6.2 Datenbank der Station 2

Zuteilen

Chips werden durch einen Linearförderer aus dem VWF zum Schieberzuteiler geführt. Das Wirkprinzip des Schieberzuteilers wird in **Abb. 9.17** gezeigt.



Aus Vibrationslinearförderer

Abb. 9.17: Chips Zuteilen

Der Schieberzuteiler hat einen Hub von 200 mm und eine Nutzlast von 1kg. Mit diesen Parametern können die Linearmodule in der **Tabelle 9.11**.

Gruppen Spannen-Verschieben und Entspannen

Die Anlagenkomponenten Greifer, Vertikal- und Horizontalschlitten werden mit einander verbunden. Es gibt verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten, in diesem Beispiel wird die Verbindungsart wie in **Abb. 9.18** festgelegt.

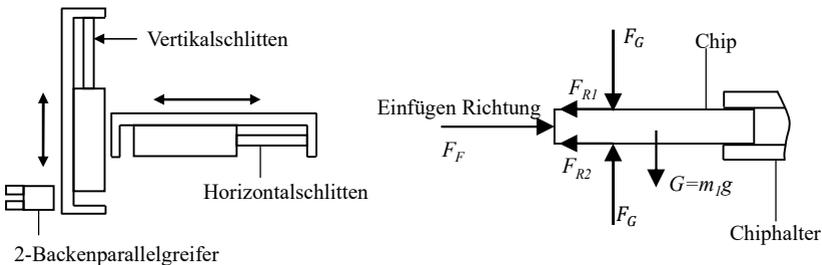


Abb. 9.18: Kombination Spannen-Verschieben und der Greifkraftbestimmung

Spannen

Zum Spannen eines Chips wird 2-Backen-Parallelgreifer verwendet. Der Chip wird wie **Abb. 9.18** gegriffen und in dem Chiphalter eingefügt.

Um den Chip nicht aus dem Greifer zu verlieren, muss die Reibungskraft F_R größer als der Verschiebungskraft sein. Zur Einfügen ein Chip von Chiphalter erfordert es eine Fügungskraft $F_F = 50 \text{ N}$. Ausgehend von **Abb. 9.18** ist die Reibungskraft bestimmt (9.16)

$$F_{R1} = \frac{F_F}{2} \quad (9.16)$$

Die Reibungskraft wird durch die Greifkraft berechnet (9.17):

$$F_{R1} = \frac{F_G}{2} \cdot \mu \quad (9.17)$$

Zur Sicherheit liegt der Sicherheitsfaktor bei $S_f = 4$ zugrunde [Hes11]. Damit wird die Reibungskraft ermittelt (9.18):

$$F_{R1} = \frac{F_G}{2} \cdot \mu \cdot S_f \quad (9.18)$$

Aus der Gleichung (9.16) und (9.18) wird die Greifkraft bestimmt:

$$F_G = \frac{F_F}{S_f \cdot \mu} = \frac{50}{4 \cdot 0,1} = 125 \text{ N}$$

Aus den Parametern, Greifkraft = 125 N; Abstand zwischen Grundbacken ab 5 mm; Greifertyp: Parallelgreifer; Hub pro Backe: bis 10 mm, werden die Varianten der Greifer gesucht und in Tabelle 9.16 gezeigt.

Tabelle 9.16: Greifer für Chips spannen [Sch17], [Zip17], [Fes17]

Menge "GFCH"	Anbieter	Antriebsart	Gewicht [kg]	Schließzeit [s]	Öffnungszeit [s]	Kosten [€]
MPG-plus 40	Schunk	Pneumatik	0,18	0,04	0,04	450
MPG-plus 64	Schunk	Pneumatik	0,53	0,045	0,045	400
MPG 50	Schunk	Pneumatik	0,35	0,035	0,035	500
RH 925	Schunk	Pneumatik	0,55	0,5	0,5	300
JPG 50	Schunk	Pneumatik	0,15	0,02	0,02	650
PFG 50	Schunk	Pneumatik	0,3	0,03	0,03	550
GM 36P	Zipatec	Pneumatik	0,34	0,025	0,025	600
DHPS 20	Festo	Pneumatik	0,25	0,058	0,097	350

Vertikalschlitten: Der Vertikalschlitten bewegt sich mit einem Hub von 50 mm und einer Nutzmasse von circa 0,5 kg. Deshalb können die Linearmodule in **Tabelle 9.13** verwendet werden.

Horizontalverschieben: Der Horizontalschlitten bewegt sich mit einem Hub von 150 mm und einer Nutzmasse von circa 2 kg sowie einer Antriebskraft von 30 N. Die Linearmodulvarianten werden in **Tabelle 9.17** beschrieben.

Tabelle 9.17: Linearmodule für Chips Horizontalverschieben [Sch17], [Nor17], [Dom17], [Afa17], [Fes17]

Menge "HSCH"	Anbieter	Antriebsart	Ausfahrzeit [s]	Einfahrzeit [s]	Kosten [€]
LM100-H150	Schunk	Pneumatik	0,26	0,26	1050
LM200-H150	Schunk	Pneumatik	0,22	0,22	1150
KLM100-H150	Schunk	Pneumatik	0,25	0,25	1100
CLM100-H150	Schunk	Pneumatik	0,26	0,26	1000
2035-6150	Norelem	Pneumatik	0,4	0,4	650
LM 6S-180	Dominio	Pneumatik	0,37	0,37	800
LM 6F-180	Dominio	Pneumatik	0,3	0,3	950
LM 25/200	Afag	Pneumatik	0,35	0,35	850
HMP-32-150	Festo	Pneumatik	0,21	0,21	1200
ELP100-H200	Schunk	Elektrik	0,32	0,32	900
ELM37-H160	Schunk	Elektrik	0,18	0,18	1700

9.6.3 Datenbank der Station 3

Zuteilen: Der Schlitten bewegt sich mit einem Hub von 175 mm und einer Nutzmasse von circa 1 kg. Die Buchsen werden im Magazin des Linearförderers gespeichert, genauso wie in der Station 2. Zur Realisierung der Funktion "Zuteilen" werden die Linearmodulvarianten in **Tabelle 9.18** verwendet.

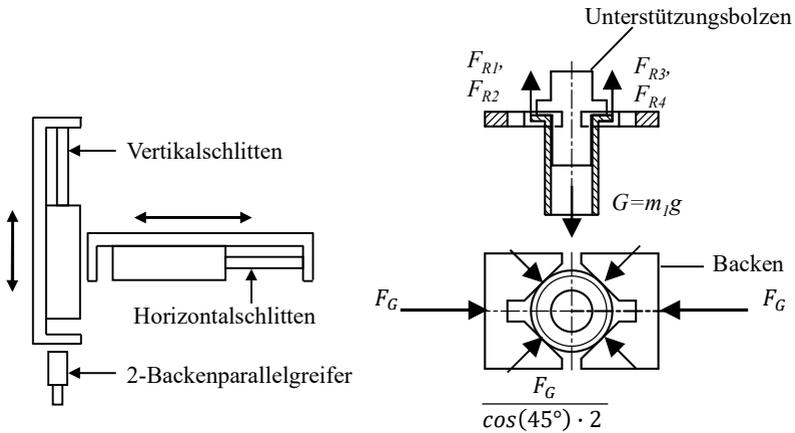
Tabelle 9.18: Linearmodule für Buchsen zuteilen [Sch17], [Nor17], [Dom17]

Menge "ZTBU"	Anbieter	Antriebsart	Ausfahrzeit [s]	Einfahrzeit [s]	Kosten [€]
LM 100-H175	Schunk	Pneumatik	0,29	0,29	1400
LM 200-H175	Schunk	Pneumatik	0,24	0,24	1500
KLM 100-H175	Schunk	Pneumatik	0,28	0,28	1450
20036-6175	Norelem	Pneumatik	0,42	0,42	1000
LM 6F-180	Domino	Pneumatik	0,32	0,32	1350
ELP100-H200	Schunk	Elektrik	0,33	0,33	2100
ELM 37-H260	Schunk	Elektrik	0,2	0,2	2000

Gruppen Spannen-Verschieben und Entspannen

Spannen

Zum Spannen einer Buchse wird ein 2-Backen-Parallelgreifer verwendet. Die Buchse wird wie in **Abb. 9.19** gegriffen.

Abb. 9.19: Ermittlung der Greifkraft F_G von Buchse

Damit die Buchse nicht fällt, muss die Reibungskraft F_R größer als der Gewichtskraft sein. Zur Sicherheit liegt der Sicherheitsfaktor bei $S_f = 4$ [Hes11]. Es wird der Gewichtskraft folgendermaßen bestimmt (9.19)

$$G = m_1 \cdot g \quad (9.19)$$

wobei:

m_1 (kg) — Gewicht der Buchse

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ — Erdbeschleunigung

Die Reibungskraft umfasst vier elementare Reibungskräfte (9.20):

$$F_R = F_{R1} + F_{R2} + F_{R3} + F_{R4} = 4 \cdot F_{R1} \quad (9.20)$$

Aus den Gleichungen (9.19) und (9.20) wird die elementare Reibungskraft F_{R1} berechnet:

$$4 \cdot F_{R1} = m_1 \cdot g \quad (9.21)$$

Die Reibungskraft F_{R1} wird nach **Abb. 9.19** festgelegt (9.22):

$$F_{R1} = \frac{F_G}{2 \cdot \cos(45^\circ)} \cdot \mu \quad (9.22)$$

μ — Haftreibungskoeffizient, $\mu = 0,1$

Dieser Greifer wird durch den Vertikalschlitten auf einem Hub 50 mm festgelegt. Die Buchse bewegt sich nach oben mit max. Beschleunigung 5 m/s^2 . Aus der Gleichung (9.21) und (9.22) wird die Greifkraft bestimmt:

$$F_G = \frac{S_f \cdot m_1 \cdot (g + a_{max}) \cdot \cos(45^\circ)}{2 \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 0,27 \cdot 14,81 \cdot 0,707}{2 \cdot 0,1 \cdot 1000} \approx 0,1 \text{ N}$$

Um die Buchse während des Umfassens zu orientieren, wird ein Unterstützungsbolzen eingesetzt (s. Abb. 9.19). Dieser Unterstützungsbolzen wird mit dem Greifer festgelegt. Eine Buchse wird in den Chiphalter durch Ausfahrkraft des Vertikalschlittens eingeschoben.

Aus den Parametern, Greifkraft ab 1 N; Abstand zwischen Grundbacken ab 8 mm; Greifertyp: Parallelgreifer; Hub pro Backe: bis 6 mm, wurden die Varianten der Greifer gesucht und in **Tabelle 9.19** gezeigt.

Vertikalschlitten: Der Vertikalschlitten bewegt sich mit einem Hub von 50 mm und einer Nutzmasse von circa 0,5 kg. Deshalb können die Linearmodule in **Tabelle 9.13** verwendet werden.

Horizontalverschieben: Der Horizontalschlitten bewegt sich mit einem Hub von 150 mm und einer Nutzmasse von circa 2 kg sowie einer Antriebskraft von 30 N. Deshalb können die Linearmodule in **Tabelle 9.17** verwendet werden.

Tabelle 9.19: Greifer für Buchsen Spannen [Sch17]

Menge "GFBU"	Anbieter	Antriebsart	Gewicht [kg]	Schließzeit [s]	Öffnungszeit [s]	Kosten [€]
MPG-plus16	Schunk	Pneumatik	0,022	0,011	0,011	450
MPG-plus20	Schunk	Pneumatik	0,035	0,012	0,012	400
MPG-plus25	Schunk	Pneumatik	0,19	0,017	0,017	350
MPG 16	Schunk	Pneumatik	0,03	0,01	0,01	300
MPG 20	Schunk	Pneumatik	0,04	0,015	0,015	250
MPG 25	Schunk	Pneumatik	0,06	0,02	0,02	200

9.6.4 Datenbank der Station 4

Um die Anwesenheit der Buchsen zu kontrollieren, werden ein Linearmodul und ein Lichtsensor verwendet. Das Linearmodul hat einem Hub von 100 mm und bewegt sich in der Vertikalrichtung. Die Linearmodulvarianten werden in **Tabelle 9.20** gezeigt.

Diese Linearmodulvarianten in **Tabelle 9.20** werden auch für die Funktion "Chiphalter spannen / Entspannen" in Station 2 verwendet.

Tabelle 9.20: Linearmodule für Vertikalschlitten [Sch17]

Menge "AWBG"	Anbie- ter	An- triebsart	Ausfahrzeit [s]	Einfahrzeit [s]	Kosten [€]
LM 50- H100	Schunk	Pneu- matik	0,2	0,2	1120
LM 100- H100	Schunk	Pneu- matik	0,18	0,18	1180
KLM 50- H100	Schunk	Pneu- matik	0,17	0,17	1200
KLM 100- H100	Schunk	Pneu- matik	0,18	0,18	1050
CLM 50- H100	Schunk	Pneu- matik	0,21	0,21	980
CLM 100- H100	Schunk	Pneu- matik	0,18	0,18	1160
ELP50- H100	Schunk	Elektrik	0,25	0,25	850
ELM37- H160	Schunk	Elektrik	0,14	0,14	1258
ELB70- H125	Schunk	Elektrik	0,11	0,11	1340

9.6.5 Datenbank der Station 5

Basierend auf dem Vorgang "Anwesenheit prüfen" in der Station 4 werden die Baugruppen an zwei Behälter übergeben. Deshalb müssen die Horizontalschlitten frei programmierbar sein. Die Kombination des Vertikal-, Horizontalschlitten sowie des Greifers wird in **Abb. 9.20** gezeigt.

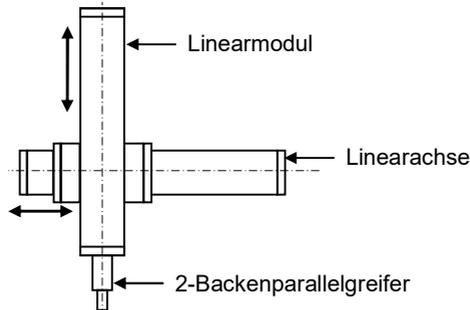


Abb. 9.20: Kombination Linearachse, Linearmodul und 2-Backengreifer

Spannen: Die Baugruppe wird mit einem Parallelgreifer genau sowie in der Station 1 gefasst. Deshalb können die Greifvarianten in der **Tabelle 9.12** verwendet werden.

Vertikalschlitten: Der Vertikalschlitten bewegt sich mit einem Hub von 50 mm und einer Nutzmasse von circa 0,5 kg. Deshalb können die Linearmodule in **Tabelle 9.13** verwendet werden.

Horizontalschlitten: Der Horizontalschlitten bewegt sich mit einem Hub bis 400 mm und einer Nutzmasse von 2 kg. Das typische Bewegungsprofil ist "Dreieck". Ausgehend von der Gleichung (9.15) und Verfahrzeit bei 400mm Hub ($t = 0,19$ s für Zahnriemenachse, $t = 0,295$ s für Spindelachse und $t = 0,21$ s für Linearachse) [Goe04] werden die max. Geschwindigkeit und Beschleunigung v_{max} , a_{max} berechnet. Die Varianten werden in **Tabelle 9.21** dargestellt.

Tabelle 9.21: Linearachse für Horizontalschlitten [Dom17], [Sch17], [Rex17]

Menge "HSBG"	An- triebs- art	zuläs- sige [v_{max}]	zuläs- sige [a_{max}]	v_{max} [m /s]	a_{max} [m /s ²]	Ver- fahr- zeit [s]	Kos- ten [€]
LM 6 P- 510	SP	1,2	-	0,83	3,4	0,48	1000
LM 8 P- 510	SP	1,2	-	1,05	5,5	0,38	2000
LM 8 PV-510	SP	1,2	-	0,88	3,9	0,45	1500
LM 6 PE-510	ZS	4	20	2,7	18,38	0,295	2500
LDK- ES-0100	LM	4	40	3,8	36	0,21	3500
MKR- 040-NN- 2	RM	2,4	50	4,2	44	0,19	4000
CKK- 145-NN- 1	KF	2,53	50	2,7	18	0,295	3000

SP: Servopneumatik

ZS: Zahnstangenantrieb

LM: Lineardirektantrieb oder Linearmotor

RM: Riemenantrieb

KF: Kugelschienenführung

Wissenschaftliche Schriftenreihe der Chemnitzer Montage- und Handhabungstechnik

(1) Heine, Andreas (2015)

Ein Beitrag zur kennwertorientierten Entwicklung kurvengesteuerter, ebener Schrittgetriebe

ISBN 978-3-944640-51-8

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-163142>

(2) Ebert, Falk (2015)

Serielle Modellierung ebener Band- und Koppelgetriebe zur domänenübergreifenden Gesamtsimulation von nichtlinearen Antriebssystemen

ISBN 978-3-944640-58-7

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-171164>

(3) Denninger, Daniel (2016)

Prozessorientierte Synthesemethodik am Beispiel der neuartigen Verlegetechnik "D-3F" zum Überflechten mit drei Fadensystemen

ISBN 978-3-944640-80-8

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-199109>

(4) Heinrich, Stefan (2018)

Modulbasierte Synthese ebener Koppelgetriebe unter Einbeziehung kinetischer Kenngrößen

ISBN 978-3-96100-066-1

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-318722>

(5) Nguyen Dang, Tan (2019)

Entwicklung eines effizienten Montageplanungssystems auf Basis von Funktionsfolgen

ISBN 978-3-96100-089-0

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-335515>