

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Marco Friedmann

**Automatisierte Konfiguration
von Greiferfingern aus einem
modularen Baukasten**

Band 306



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Marco Friedmann

Automatisierte Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten

Band 306

Automatisierte Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Marco Friedmann, M.Sc.

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2025
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2025

Copyright Shaker Verlag 2026

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

Printed in Germany.

Print-ISBN	978-3-8191-0578-4
PDF-ISBN	978-3-8191-0628-6
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung dieser Arbeit, die persönliche Unterstützung und das Vertrauen in meine Arbeit als akademischer Mitarbeiter und später auch als Gruppenleiter und Oberingenieur. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich für die Übernahme des Korreferats sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Arne Rönnau für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenso möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen wie auch den Ehemaligen des wbk, insbesondere aus dem Forschungsbereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung bedanken. Das offene und wertschätzende Arbeitsumfeld sowie die vielen gemeinsamen Aktivitäten innerhalb und außerhalb des wbk haben diese Zeit in besonderer Weise geprägt und werden mir in nachhaltiger Erinnerung bleiben. Darüber hinaus danke ich allen Studierenden, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte durch ihre Mitarbeit den Fortschritt meiner Forschung und die Fertigstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt zudem Prof. Dr.-Ing. Christian Friedrich und Dr. Martin May für die konstruktive und kritische Auseinandersetzung mit den Inhalten dieser Dissertation sowie die daraus resultierenden hilfreichen Impulse.

Mein größter Dank gilt meiner Familie: Meinen Eltern Sabine und Thomas, für ihre stetige Unterstützung, ihren Rückhalt und die fachlichen Diskussionen, die zur inhaltlichen Schärfung dieser Arbeit beigetragen haben als auch meiner Schwester Julia für ihre ermutigende und stärkende Art. Abschließend möchte ich mich besonders bei meiner Frau Nina bedanken, die die Entstehung dieser Arbeit von Anfang bis zum Ende begleitet und mich dabei in großen wie in kleinen Dingen auf wunderbare Weise unterstützt hat.

Karlsruhe, im Dezember 2025

Marco Friedmann

Kurzfassung

Die zunehmende Nachfrage nach individualisierten Produkten, die beschleunigte Dynamik von Markttrends sowie die Volatilität globaler Lieferketten erfordern von Unternehmen eine hochgradig flexible und zugleich automatisierte Produktion, um langfristig erfolgreich zu sein. Für Handhabungssysteme als Bestandteile nahezu aller automatisierten Fertigungsprozesse – und speziell für deren Greifer, die den direkten Kontakt zu den Handhabungsobjekten herstellen – entstehen daraus eine Vielzahl neuer Anforderungen, insbesondere hinsichtlich Produkt- und Umrüstflexibilität.

Die Gestaltung der Wirkelemente – insbesondere der Finger von Fingergreifern – erfolgt bislang weitestgehend manuell, ist komplex und erfordert ein hohes Maß an Expertise. Diese so entstehenden Finger als monolithische Strukturen erschweren eine schnelle Anpassung an wechselnde Produktionsbedingungen. Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise, die in Abhängigkeit von Greifermodell und Handhabungsobjekt die optimale Greiferfingerkonfiguration, bestehend aus Modulen eines Baukastens, ermittelt. Die Greiferfingerkonfiguration umfasst die Definition der Greifpositionen am Handhabungsobjekt, die benötigten Module und deren Anordnung. Dafür werden in dieser Arbeit Vorgehensweisen zur Entwicklung des Baukastens, zur Greifpositionsbestimmung sowie zur Ermittlung und Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen entwickelt, validiert und zu einem systematischen Verfahren kombiniert. Das Vorgehen zur Baukastenentwicklung, das auf Methoden der Produktentwicklung basiert, ermöglicht die systematische und nachvollziehbare Definition eines Greiferfingerbaukastens. Bei geringer interner Vielfalt an Modulen kann so eine große Anzahl an Greiferfingern realisiert werden. Um eine Greiferfingerkonfiguration für mehrere Handhabungsobjekte verwenden zu können, werden möglichst unterschiedliche Greifpositionen an einem Handhabungsobjekt benötigt. Ein analytisches Verfahren ermittelt diejenigen Greifpositionen, die hinsichtlich ihrer Griffqualität, der Größe der Kontaktfläche und der Lokalisierung auf möglichst unterschiedlichen Oberflächenteilen der Handhabungsobjekte am besten geeignet sind. Die Konfiguration der jeweils optimalen Greiferfinger erfolgt auf Basis eines einheitlichen Beschreibungsmodells der Module, deren Anordnung als kinematische Kette und der Bewertung anhand unabhängiger Kriterien. Anhand von zwei Greifermodellen und einem Handhabungsobjektspektrum wird die Methode erprobt und validiert.

Abstract

The increasing demand for customized products, the accelerated dynamics of market trends, and the volatility of global supply chains require companies to possess highly flexible and automated production in order to be successful in the long term. For handling systems, which are used in almost all automated manufacturing processes – and especially for their grippers, which make direct contact with the workpieces – this results in a multitude of new requirements, particularly with regard to product and retooling flexibility.

The design of the contact elements, particularly the fingers of finger grippers is mostly manual, complex, and requires a significant degree of expertise. The resulting fingers, which are monolithic structures, impede the ability to adapt quickly to changing production conditions. Against this background, the objective of this work is to develop a systematic approach that determines the optimal gripper finger configuration, consisting of modules from a construction kit, depending on the gripper model and the workpiece. The gripper finger configuration encompasses the delineation of gripping positions on the workpiece, the requisite modules, and their arrangement. To this end, this thesis develops and validates procedures for the development of the construction kit, the determination of gripping positions, and the identification and evaluation of gripper finger configurations, which are then combined into a systematic framework. The construction kit development process, which is based on product development methods, enables the systematic and traceable definition of a gripper finger construction kit. With a low internal diversity of modules, a large number of gripper fingers can be realized. The utilization of a gripper finger configuration for the handling of multiple objects necessitates the availability of a wide range of gripping positions on the workpiece itself. For this purpose, an analytical method has been developed to determine gripping positions that are optimized for gripping quality, contact area, and localization on various surfaces of the workpiece. The configuration of the respective optimal gripper fingers is based on a uniform description model of the modules, their arrangement as a kinematic chain, and evaluation using independent criteria. The method is tested and validated using two gripper models and a range of handling objects.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VII
1 Einleitung	10
1.1 Motivation	10
1.2 Aufbau der Arbeit	10
2 Stand der Forschung und Technik	12
2.1 Begriffe und Definitionen	12
2.2 Grundlagen von Greifern	13
2.2.1 Aufbau und Funktionsweise von Greifern	14
2.2.2 Arten von Greifern	16
2.2.3 Flexibilisierung von Greifersystemen	18
2.3 Gestaltung der Greiferfinger	21
2.3.1 Arten von Greiferfingern	22
2.3.2 Automatisierte Bestimmung der Greifposition	27
2.3.3 Automatisierte Greiferfingergestaltung	32
2.3.4 Funktionsintegration im Greiferfinger	37
2.4 Produktkonfiguration	39
2.4.1 Produktkonfiguration in der Greiftechnik	43
2.4.2 Methoden der Modularisierung	45
2.5 Folgerungen aus dem Stand der Technik	63
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	65
4 Methode zur automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger	67
4.1 Anforderungen an die Methode	67
4.1.1 Methodische Anforderungen an die Entwicklung	67
4.1.2 Technische Anforderungen	67
4.2 Einordnung und Betrachtungsraum der Methode	68

4.3	Ablauf der Methode	70
4.3.1	Baukastengestaltung	70
4.3.2	Konfiguration	72
4.3.3	Bewertung und Realisierung	72
5	Baukastengestaltung	73
5.1	Definition der Baukastenziele	74
5.2	Anforderungsanalyse	74
5.3	Modularisierung	76
5.4	Schnittstellengestaltung	78
5.5	Variantengerechte Fingergestaltung	79
5.6	Modulgestaltung	81
6	Konfiguration	83
6.1	Spezifikation der Greifaufgabe	83
6.2	Greifpositionsbestimmung	84
6.3	Konfiguration	88
6.3.1	Modulbeschreibung	90
6.3.2	Formulierung der kinematischen Kette	91
6.3.3	Nebenbedingungen	94
6.3.4	Ablauf der Konfiguration für ein Handhabungsobjekt	101
7	Bewertung	103
7.1	Bewertung der Fingerqualität	103
7.1.1	Fingerlänge	104
7.1.2	Auskragung	104
7.1.3	Flexibilität	105
7.1.4	Modulanzahl	105
7.1.5	Taktzeit	105
7.1.6	Bewertungsmetrik	106
7.2	Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes	107
7.2.1	Konfiguration für eine Folge von Handhabungsobjekten	107

7.2.2	Rekonfigurationsaufwand	110
7.3	Auswahl der geeignetsten Konfiguration	113
7.4	Ergebnis der automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger	119
8	Erprobung der Vorgehensweisen	120
8.1	Betrachtungsraum und Vorbemerkungen	120
8.2	Baukastengestaltung	121
8.2.1	Definition der Baukastenziele	121
8.2.2	Anforderungsanalyse	122
8.2.3	Modularisierung	126
8.2.4	Schnittstellengestaltung	130
8.2.5	Variantengerechte Gestaltung	142
8.2.6	Modulgestaltung	160
8.3	Konfiguration	170
8.3.1	Softwaretechnische Umsetzung des Vorgehens	171
8.3.2	Handhabungsobjekte	171
8.3.3	Erprobung der Greifpositionsbestimmung	172
8.3.4	Erprobung der Konfiguration	174
8.4	Erprobung der Konfigurationsbewertung	177
9	Ergebnisse und Bewertung	188
9.1	Ergebnisse der Baukastenentwicklung	188
9.1.1	Baukastenanalyse	189
9.1.2	Baukastenoptimierung	191
9.1.3	Funktionsintegration	193
9.2	Greiferfingerkonfiguration	193
9.2.1	Ergebnisse der Greifpositionsbestimmung	193
9.2.2	Ergebnisse der Greiferfingerkonfiguration	194
9.2.3	Bewertung von Handhabungsobjektfolgen	196
10	Zusammenfassung und Ausblick	199
10.1	Zusammenfassung	199

10.2 Ausblick	200
11 Publikationsliste	I
12 Literaturverzeichnis	VI
13 Abbildungsverzeichnis	XXXIV
14 Tabellenverzeichnis	XLIII
Anhang	XLVII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
ATO	Assemble to Order
BSWS	Backenschnellwechselsystem
BTO	Build to Order
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
DFX	Design for X
DSM	Design Structure Matrix
ETO	Engineer to Order
FFC	Flat Flexible Cable (Flaches flexibles Kabel)
GOFD	Generic Optimized Finger Design
GND	Ground
HoQ	House of Quality
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IGTA	Idicula-Gutierrez-Thebeau Algorithmus
IMEC	Interface Matrix Evaluation Chart
MAST _E R	Mustergültige Anforderungen - die Sophist-Templates für Requirements
MCI	Module Coupling Independence
MIG	Module Interface Graph
MIM	Module Indication Matrix
MISO	Master Input, Slave Output
MOSI	Master Output, Slave Input
MPC	Module Process Chart
MTM	Methods-Time Measurement
MTO	Make to Order
PCB	Printed Circuit Board
PKT	Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
SDA	Serial Data

SCL	Serial Clock
SCLK	Serial Clock
SS	Slave Select
ToF	Time of Flight
VAM	Variety Allocation Model

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
\tilde{A}	Eingangskoordinatensystem eines Moduls	
A	Fläche	mm ²
a	Schnittpunkt mit der x-Achse	mm
B	Magnetische Flussdichte	T
\tilde{B}	Ausgangskoordinatensystem eines Moduls	
b	Schnittpunkt mit der y-Achse	mm
c	Federkonstante	N/m
$conv(\{w_i\})$	Konvexe Hülle über alle Wrenches	
ε	Maß für die Stabilität eines Griiffs	
Δx	Auflösung für den Nutzwert des Rekonfigurationsaufwandes	
DSM	Design Structure Matrix	
E	Kante im Schichtgraph	
F	Kraft	N
f_x	Anteil einer Kraft in x-Richtung	N
f_y	Anteil einer Kraft in y-Richtung	N
f_z	Anteil einer Kraft in z-Richtung	N
G	Greiferkoordinatensystem	
H_k	Hüllkurve	
l	Länge	mm
l_{zul}	Zulässige Fingerlänge	mm
k_{SZS}	Sequenziell zusammengefasste Module der Startkonfiguration	
k_{SZE}	Sequenziell zusammengefasste Module der Endkonfiguration	
K_{Komp}	Anzahl der zusätzlichen Unterscheidungsmerkmale, die die Vielfalt einer Komponente verursachen	
K_{Unt}	Die durchschnittliche Anzahl der zusätzlichen Komponenten, die aufgrund eines Unterscheidungsmerkmals variant sind	
max_Cl_size	Maximum cluster size	
MCI	Module Coupling Independence	
m_{zul}	Zulässige Masse	kg
λ	Strafmaß	

$N_{Kop A}$	Anzahl der varianten Komponenten mit starken Kopplungen	
$N_{Kop B}$	Anzahl der varianten Komponenten mit mittleren Kopplungen	
$N_{Var A}$	Anzahl varianter Komponenten mit hohen anteiligen Kosten	
$N_{Var B}$	Anzahl varianter Komponenten mit mittleren anteiligen Kosten	
$N_{Var Ges}$	Anzahl varianter Komponenten	
n_m	Anzahl der Montageschritte	
n_d	Anzahl der Demontageschritte	
P	Massepunkt	
\vec{p}	Positionsvektor	
pow_{bid}	Power of Bidding Cost	
pow_{cc}	Power of Customer Cost	
pow_{deb}	Power of Depot Cost	
R	Rotationsmatrix	
R_i	Gewichtung einer Kante im Schichtgraph	
$R_{Rekonfig.}$	Rekonfigurationsaufwand	
$rand_{accept}$	Random Acceptance Factor	
$rand_{bid}$	Random Bidding Factor	
ρ	Dichte	kg/m ³
$stable_{limit}$	Stability Limit	
t	Montageposition eines Moduls in der kinematischen Kette	
$times$	Time Limit	
τ	Moment	Nm
Θ	Rotationswinkel	rad
Θ	Eulerparameter	
V	Knoten im Schichtgraph	
w	Wrench	N | Nm
$w(l)$	Durchbiegung	m
x_F	Gewichtungsfaktor für den Rekonigurationsaufwand	
X_i	Aktivierungsfunktion	
x_R	Gewichtungsfaktor für die Fingerqualität	
Y	Auskragung	mm
Y_i	Aktivierungsfunktion	

Z	Fingerlänge	mm
---	-------------	----

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die industrielle Produktion befindet sich in einem fortschreitenden Wandel hin zu einer stärkeren Vernetzung, Automatisierung und höheren Flexibilität der Produktionsprozesse. Auslöser und Treiber dieses Wandels sind häufig wechselnde Kundenanforderungen, eine steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten, steigende Qualitätserwartungen und die Forderungen nach einer hohen Produktverfügbarkeit bei gleichzeitig niedrigen Kosten (Krause & Gebhardt, 2018, S. 6; Pansare, Yadav & Nagare, 2023, S. 229). Ein zentrales Element dieser Entwicklung stellen Industrieroboter dar, die durch ihre flexiblen Einsatzmöglichkeiten weiterhin in rasant steigender Zahl in der industriellen Produktion, hauptsächlich für Handhabungsprozesse und zur Maschinenbeschickung, eingesetzt werden (Backer et al., 2018, S. 15; Schmalz, 2018, S. 1).

Um kleine Losgrößen flexibel und schnell produzieren zu können, muss der Anpassungsprozess von Produktionslinien an ein verändertes oder neues Produkt erheblich verkürzt werden. Dabei kommt den Handhabungssystemen als Bestandteil nahezu jedes automatisierten Prozesses eine besondere Bedeutung zu (Friedmann & Fleischer, 2022, S. 70). Während die Verwendung von Greifern mit mehreren Freiheitsgraden hochkomplex ist und in der Grundlagenforschung untersucht wird, werden für die meisten industriellen Handhabungsaufgaben weiterhin Zweifingerparallelgreifer eingesetzt. Eine der größten Hürden für die schnelle Anpassung dieser Systeme ist die langsame und kostenintensive Modifikation der Wirkelemente, die in der Regel eine iterative manuelle Konstruktion, Produktion und Montage dieser umfasst (Ringwald et al., 2023, S. 1867).

Vor diesem Hintergrund beschreibt die vorliegende Arbeit die Entwicklung einer Methode zur automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger aus einem Baukasten. Dabei steht die Durchgängigkeit der Methode von der Definition des Baukastens über die Konfiguration bis hin zur Bewertung der ermittelten Finger im Vordergrund.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zehn Kapitel. In Kapitel zwei werden zunächst die Grundlagen und Begriffe sowie der Stand der Forschung und Technik im Bereich der Greiferfingergestaltung und angrenzenden Themenbereichen beschrieben. Es sei

an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in diesem Grundlagenkapitel dem Leser einerseits ein möglichst umfassendes Bild zum Stand der Greiferfingergestaltung vermittelt und andererseits ein Verständnis für die bei der Methodenentwicklung relevanten Themengebiete aufgebaut werden soll. Die beschriebenen Themen sind im Hinblick darauf gewählt und erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, z.B. im Bereich der Entwicklung modularer Produktfamilien. In Kapitel drei erfolgt die Beschreibung der Zielsetzung und Vorgehensweise, die sich aus der Analyse des Grundlagenkapitels ableitet. Der wesentliche Bedarf, der sich aus der Analyse ergibt, ist die Entwicklung einer durchgängigen Methode, die den Anwender – ausgehend von einem festgelegten Umfang an Greifermodellen – von der Definition eines möglichst optimalen Baukastens, über die Ermittlung und Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen, bis hin zur Ermittlung der notwendigen Anzahl verschiedener Greiferfingerkonfigurationen unterstützt. Ein Überblick der Methode und ihrer Bestandteile wird im vierten Kapitel beschrieben, auf die dann in den Kapiteln fünf bis sieben detailliert eingegangen wird. Im achten Kapitel wird die Eignung der Methode zur Erreichung der Zielsetzung praktisch erprobt und die zuvor beschriebenen Logiken werden informationstechnisch implementiert. Nach einer Betrachtung der Ergebnisse in Kapitel neun werden die Arbeitsergebnisse in Kapitel zehn zusammengefasst und mögliche zukünftige Forschungsarbeiten beschrieben.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Begriffe und Definitionen

In der Handhabungstechnik existieren eine ganze Reihe von Fachbegriffen, die teilweise synonym verwendet oder nicht eindeutig differenziert werden. Daher sollen im Folgenden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit geltenden Definitionen dieser Begriffe beschrieben werden.

Handhaben

Handhaben bezeichnet das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem (VDI 2860:1990-05).

Handhabungssystem

Als Handhabungssystem wird das Gesamtsystem bezeichnet, das zur Durchführung einer Handhabungsaufgabe definiert werden muss. Es berücksichtigt die Domänen Handhabungsgerät, Handhabungsobjekt, Prozess, Umwelt und Greifer (Schmalz, Kiefer & Behncke, 2015, S. 27).

Greifersystem

Ein Greifersystem stellt als Teilsystem des Handhabungssystems den zeitweiligen Kontakt zwischen Handhabungsgerät und Handhabungsobjekt her. Während dieses Kontakts sichert das Greifersystem die Position und Orientierung des Handhabungsobjektes relativ zum Handhabungsgerät. Es setzt sich zusammen aus dem physischen Greifergrundkörper, den Wirkelementen zur Übertragung der Greifkraft auf das Handhabungsobjekt sowie den zugehörigen Funktionseigenschaften, wie beispielsweise der Strom, mit dem der Greifer betrieben wird (Hesse & Malisa, 2016, S. 119; Schmalz, 2018, S. 8).

Kontaktstelle

An der Kontaktstelle berühren sich das Wirkelement des Greifersystems und das Handhabungsobjekt. Der Kontakt kann dabei als Punkt(e), Linie(n) oder Fläche ausgeprägt sein. Am Handhabungsobjekt besteht die Kontaktstelle aus Oberflächensegmenten, die innerhalb gewisser, vom Nutzer vorgegebener, Toleranzen in einer Ebene liegen und über ähnlich orientierte Normalenvektoren verfügen (Hesse & Malisa, 2016, S. 122; Schmalz, 2018, XVIII).

Greiferfinger

Der Greiferfinger ist ein starres, elastisches oder mehrgliedriges Wirkelement eines Greifersystems. Als aktive Komponente der Wirkpaarung zwischen Greifer und Handhabungsobjekt überträgt der Greiferfinger die Greifkraft auf das Handhabungsobjekt (Hesse & Malisa, 2016, S. 120).

Grundbacke

Die Grundbacke ist eine vom Greiferantrieb bewegte Komponente mit mechanischer Schnittstelle, über die die Wirkelemente am Greifer befestigt werden (Hesse & Malisa, 2016, S. 122).

Wirkelement

Ein Wirkelement ist ein Teilsystem eines Greifersystems, welches die Kraftübertragung des Greifersystems auf das Werkstück sicherstellt. Bei mechanischen Greifern werden die Wirkelemente als Greiferfinger bezeichnet (Wolf & Schunk, 2016, S. 115).

Wirkfläche

Die Wirkfläche ist Bestandteil des Greiferfingers und dient als Schnittstelle zwischen Greiferfinger und Handhabungsobjekt. Die Wirkfläche kann austauschbar gestaltet sein, um die Wirkpaarung zwischen Greifer und Handhabungsobjekt zu verbessern, oder um bei Verschleiß ausgetauscht zu werden (Hesse & Malisa, 2016, S. 120).

2.2 Grundlagen von Greifern

Die übergeordneten Ziele bei der Automatisierung industrieller Prozesse sind die Erhöhung der Produktivität, die Verkürzung der Fertigungszeiten, die Erleichterung der menschlichen Arbeit, die Senkung der Kosten sowie die Erhöhung der Qualität. Daraus lässt sich folgern, dass der Einsatz der Handhabungstechnik die Erreichung dieser Ziele sicherstellen soll (Heinrich, Linke & Glöckler, 2017, S. 6).

Die Interaktion mit der Umwelt erfolgt bei Handhabungssystemen über ein Werkzeug, den sogenannten Endeffektor, am Ende der kinematischen Kette. Der Endeffektor ist als Vorrichtung speziell zum Anbringen an die mechanische Schnittstelle des Handhabungsgerätes – in der Regel ein Roboter – konstruiert, und dient zur Ausführung einer erforderlichen Aufgabe durch die Anwendung von Aktionen auf eine Aufgabenumgebung (DIN EN ISO 8373:2010-06). Neben Fertigungsverfahren, wie Schweißen oder Schleifen, werden mehr als die Hälfte der in der Industrie eingesetzten Roboter für

Handhabungs- und Montageoperationen verwendet (International Federation of Robotics, 2020, S. 15; Nof, 2010, S. 11–14). Heute enthält nahezu jeder automatisierte Produktions- oder Montageprozess auch Handhabungsoperationen, denn immer, wenn Werkstücke oder Produkte transportiert, gelagert, kommissioniert oder montiert werden müssen, wird eine Handhabung erforderlich (Feldmann, 2014, S. 337; Siciliano et al., 2009, S. 18; Wolf & Schunk, 2016, S. 17). Hierfür werden Greifer verwendet, die durch das Handhabungsgerät positioniert sowie orientiert werden und dann über die Wirkelemente den Kontakt zum Werkstück herstellen (VDI 2740:1995-04).

2.2.1 Aufbau und Funktionsweise von Greifern

Bei der Entwicklung von Greifern ist die menschliche Hand die Referenz in der Natur und bisher unübertroffen. Die Vielzahl an möglichen Greifmodi in Kombination mit den Überwachungsmöglichkeiten durch Sehen, Hören und Fühlen mit den anderen Sinnesorganen des Menschen, machen die Hand zum idealen Greifwerkzeug (Carbone, 2013, S. 13; Lundström, 1974, S. 80). Die Übertragung dieser Fähigkeiten auf ein technisches System erfordert jedoch eine komplexe Mechanik und Steuerungsalgorithmen, was hohe Kosten mit sich bringt und die Systeme gleichzeitig anfällig für Fehler macht. Aufgrund der Tatsache, dass Roboter in industriellen Anwendungen oft nur begrenzte Formen von Objekten oder Teilen handhaben und begrenzte Arten von Aufgaben ausführen müssen, sind menschenähnliche Hände nicht wirtschaftlich (Belter et al., 2013, S. 599; Carbone, 2013, S. 13).

Die Aufgaben eines Greifers können über Funktionen beschrieben werden. Die Hauptfunktion des Greifers besteht in dem Sichern von Objekten. Diese Hauptfunktion lässt sich in die Teilfunktionen Aufnehmen, Spannen, Lage sichern und Ablegen untergliedern. Darüber hinaus erfüllen Greifer weitere Funktionen, wie das Speichern, Bewegen und Menge verändern, oder die Informationsaufnahme durch Sensoren sowie weitere Koppel-, Schutz-, Steuer- und Arbeitsfunktionen (Pott & Dietz, 2019, S. 38; Reinhart, Magaña Flores & Zwicker, 2018, S. 27). Manche der genannten Funktionen werden von Komponenten des Handhabungsgerätes übernommen.

Anhand der genannten Funktionen können die Bestandteile eines Greifersystems abgeleitet werden:

- (Kollisionsschutz)
- Adaptersystem

- Wechselsystem
- Antriebssystem
- Steuersystem
- Trägersystem
- Kinematik
- Sensorik
- Wirksystem

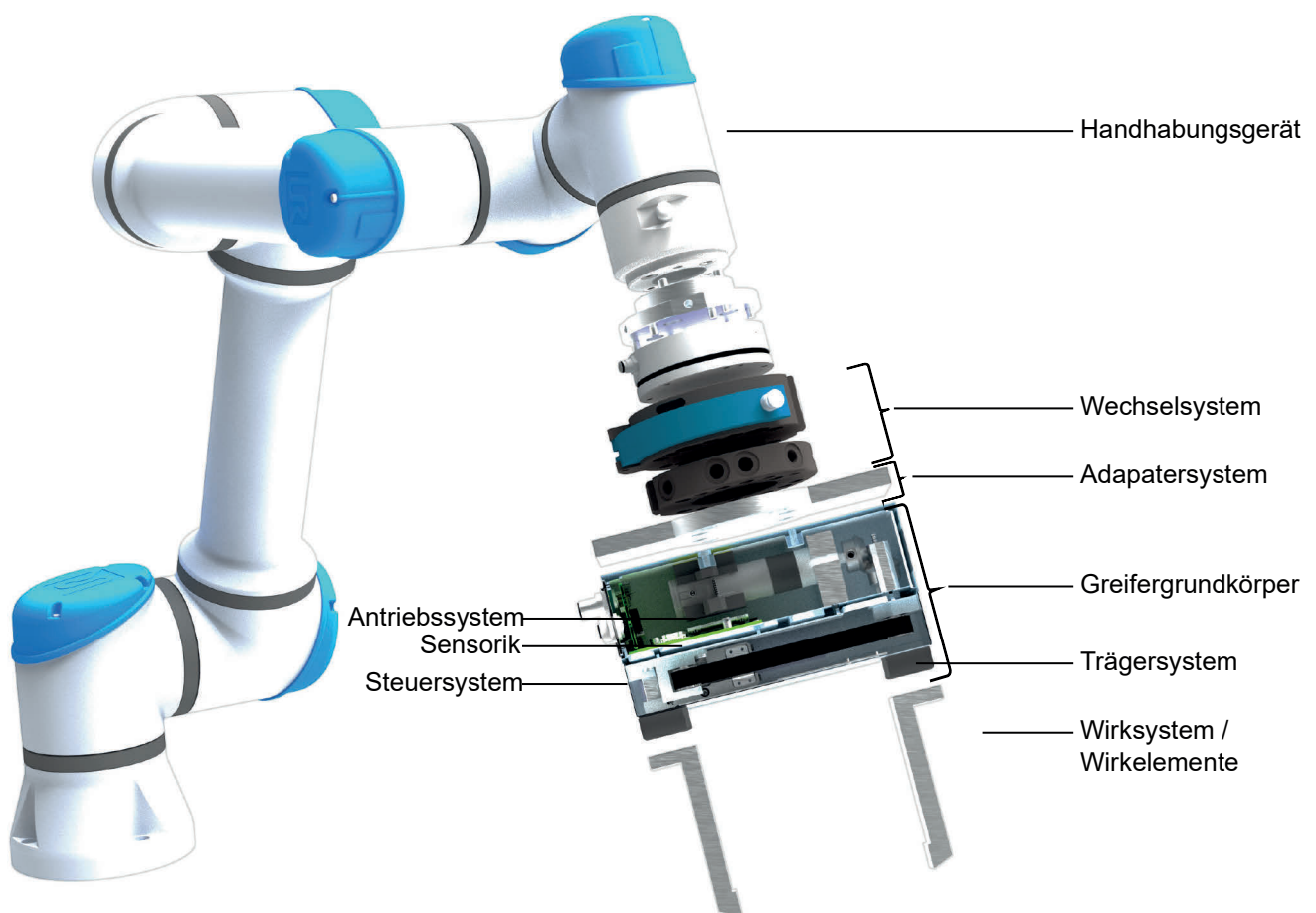


Abbildung 2-1: Teile eines Handhabungssystems mit mechanischem Greifer in Schnittdarstellung (eigene Darstellung in Anlehnung an Hesse, 2020, S. 343; Reinhart, Magaña Flores & Zwicker, 2018, S. 27)

Die Komponenten und der Aufbau eines Greifers bzw. eines Greifersystems unterscheiden sich je nach Wirkprinzip. Für die verschiedenen Greifertypen lassen sich jedoch die Grundelemente Greifergrundkörper und Wirkelemente festhalten (Schmalz, 2018, S. 8). Der Greifergrundkörper beinhaltet beispielsweise den Antrieb, Sensoren, Verarbeitungselektronik, die Kinematik, und bildet die Schnittstelle zum Handhabungsgerät oder zu weiteren Komponenten des Greifersystems (Feldmann, 2014, S. 340).

Dem Antrieb kommt die Aufgabe der Umwandlung einer Primärenergie in eine Nutzenergie zur Ausführung der Greifbewegung zu. Im industriellen Umfeld werden dafür vor allem druckbetriebene, fluidische und elektrische Antriebe verwendet. Die Wirkelemente stellen den Kontakt zum Werkstück her und übertragen damit die im Greifergrundkörper erzeugte Greifkraft auf das Werkstück (Hesse, 2020, S. 343–345).

2.2.2 Arten von Greifern

Greifer werden schon seit mehr als 2.000 Jahren entwickelt, um dem Menschen die Handhabung von Objekten zu erleichtern. Die Entwicklung fand dabei meist als Teil eines Gesamtsystems für die Manipulation oder Handhabung statt. Die Verwendung von Gelenkmechanismen zur Steigerung der Effizienz in Bezug auf die Betätigungskraft, auf denen auch heutige industrielle Greifer noch basieren, begann jedoch erst im 19. Jahrhundert (Carbone, 2013, S. 5–11).

Seither wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Greifer entwickelt, die sich nicht mehr nur nach dem Wirkprinzip unterscheiden lassen. So können Greifer nach der Anzahl der Finger, dem physikalischen Greifprinzip, der Greifmethode, oder auch nach der Anzahl an Greifobjekten, die mit dem Greifer gleichzeitig gegriffen werden können, unterschieden werden. Unterscheidungsmöglichkeiten von Greifern sind in der Literatur z.B. in (Hesse & Malisa, 2016, S. 134), (Reinhart, Magaña Flores & Zwicker, 2018, S. 28) oder (Seegräber, 1993, S. 40–58) beschrieben.

Die weltweite Verteilung von industriell eingesetzten Greifern hat sich seit ihrer Einführung wenig verändert: So werden etwa 80 % aller industriellen Handhabungsoperationen mit mechanischen Greifern umgesetzt. Davon stellen Zweifinger-Parallelbackengreifer mit einem Anteil von ca. 45 % die größte Gruppe dar. Danach folgen Winkelgreifer mit 20 % sowie Drei- und Vierfingergreifer mit 15 %. Von den noch offenen 20 % der Handhabungsoperationen werden 15 % mit Sauggreifern umgesetzt (Hesse, 2011, S. 67; Lundström, 1974, S. 72). Im Folgenden soll genauer auf die verbreitetsten Bauformen eingegangen werden.

Bei den industriell am häufigsten eingesetzten **Zweifinger-Parallelbackengreifern** bewegen sich zwei gegenüberliegende Grundbacken translatorisch auf parallelen Achsen entweder aufeinander zu oder voneinander weg. Ein wesentlicher Grund für die weite Verbreitung dieses Greifertyps ist die über den gesamten Hub konstante Greifkraft. Die Bewegung der Grundbacken ist in der Regel zwangssynchronisiert und ermöglicht so ein zentrisches Greifen. Angetrieben werden diese Greifer pneumatisch, hydraulisch

oder elektrisch (Kurfess, 2005, S. 215f.; Pott & Dietz, 2019, S. 40; Wolf & Schunk, 2016, S. 158). Pneumatische Greifer mit ihrem günstigen Verhältnis von erreichbarer Greifkraft zu Eigengewicht werden heute noch für viele Anwendungen bevorzugt eingesetzt. Der Anteil elektrisch angetriebener Greifer wächst jedoch, einerseits aufgrund der stetigen Optimierung ihrer Kosten und Leistungsfähigkeit, andererseits wegen der Möglichkeiten zur Programmierung von Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Greifkraft. Weitere Vorteile liegen in der Flexibilität, z.B. aufgrund der schnellen Umrüstbarkeit durch Programmwahl bei Produktwechsel (Carbone, 2013, S. 226; Pott & Dietz, 2019, S. 40; Samadikhoshkho, Zareinia & Janabi-Sharifi, 2019, S. 2). Bei Greifern mit großen Hublängen und großen Zylinderquerschnitten werden die Energiekosten zu einem immer wichtigeren Aspekt und auch bei Geräuschpegel und Vibrationen bieten elektrische Antriebe Vorteile (Chaudhari & Shinde, 2014, S. 173). Der kinematische Aufbau, d.h. die Konstruktion zur Wandlung der Antriebsenergie in die gewünschte Bewegung der Grundbacken kann unterschiedlich gestaltet sein. Verbreitet sind Keilhaaken-, Kulissen-, Zahnrad- oder Viergelenkgetriebe (Kurfess, 2005, S. 216; Seegräber, 1993, S. 30). Die Grundbacken von Parallelgreifern werden entweder gleitgeführt, beispielsweise in T-Nuten- oder Vielzahnführungen, oder wälzgeführt, z.B. mit Kreuzrollenführungen oder Profilschienen (Feldmann, 2014, S. 342f.; Hesse, 2011, S. 60).

Bei **Winkelgreifern** bewegen sich die Wirkelemente rotatorisch und schwenken beim Öffnen aus dem Greifbereich heraus. Unterschieden wird zwischen Winkelgreifern, die Öffnungswinkel zwischen -10° und $+40^\circ$ je Finger realisieren, und Radialgreifern, die ihre Wirkelemente je bis zu 90° schwenken können (Feldmann, 2014, S. 351; Hesse, 2011, S. 74). Die zur Verfügung stehende Greifkraft ist oftmals nicht konstant über den gesamten Winkelbereich. Der wesentliche Vorteil liegt in der großen Öffnungsweite, jedoch wirkt sich diese wiederum negativ auf den benötigten Freiraum und eine günstige Gestaltung der Peripherie aus (Seegräber, 1993, S. 56). Die Übertragung der Antriebsenergie in die Schwenkbewegung der Wirkelemente geschieht mit Zahnrad-, Kniehebel- oder auch Nutkurvengetrieben (Hesse, 2011, S. 58).

Genauso wie die zuvor genannten Zweifinger-Parallelbackengreifer zählen auch **Drei- und Vierfingergreifer** zu den mechanischen Greifern. Dreifingergreifer ähneln in ihrem Aufbau Spannfüßern von Werkzeugmaschinen, wobei die drei Grundbacken ein gleichseitiges Dreieck aufspannen (Reinhart, Magaña Flores & Zwicker, 2018, S. 28). Vierfingergreifer stellen Nischenprodukte dar, die sich bei der Handhabung von vierkantigen oder zylindrischen Werkstücken als vorteilhaft erweisen und eine hohe Präzision

beim Aufnehmen, Ausrichten und Fügen ermöglichen (Carbone, 2013, S. 374; Hesse, 2011, S. 26).

Als Greifer werden auch Endeffektoren bezeichnet, die Werkstücke zwar handhaben, aber nicht im eigentlichen Sinne zugreifen. Gerade bei flächigen Werkstücken, wie sie bei Verpackungsaufgaben oder bei der Handhabung von Blechen und Holzplatten vorliegen, werden häufig **Sauggreifer** verwendet (Hesse, 2011, S. 1; Wolf & Schunk, 2018, S. 116). Die Haltekraft beim Saug- oder Vakuumgreifen wird über eine Druckdifferenz zwischen dem Umgebungsdruck und einem reduzierten Luftdruck unter dem Greifer erzeugt. Die Elemente dieser Greifsysteme, die den direkten Kontakt zum Werkstück herstellen, sind meist flexibel ausgeführt, um sich an die Kontaktstelle anzupassen und diese gegenüber der Umgebung abzudichten. Nach erfolgter Abdichtung kann dann der Unterdruck im Inneren erzeugt und so die Haltekraft aufgebaut werden. Der dann höhere Umgebungsdruck presst das Werkstück gegen die Dichtlippen des Saugers (Hesse, 2011, S. 110). Der in der Regel technisch einfache Aufbau, ohne mechanisch bewegte Teile und mit einfach austauschbaren, kostengünstigen Komponenten, sowie der Möglichkeit zur werkstückschonenden Handhabung macht das Vakuum- und Sauggreifen zu einem in der Industrie weit verbreiteten Handhabungsprinzip (Hesse, 2020, S. 358f.). Allerdings schwankt die Haltekraft mit den Änderungen des Umgebungsdrucks und ist stark von der räumlichen Orientierung des Greifers bei der Handhabung abhängig. Darüber hinaus können Vakuumgreifer in der Montage nur bedingt eingesetzt werden, da sie die Anforderungen einer hochpräzisen Positionierung der Werkstücke nicht erfüllen (Carbone, 2013, S. 380).

2.2.3 Flexibilisierung von Greifersystemen

Mit der zunehmenden Individualisierung der Nachfrage und der damit einhergehenden Zunahme an Produktvarianten steigt der Bedarf nach mehr Flexibilität in den Produktionsprozessen, und damit wachsen auch die Anforderungen an die eingesetzten Greifsysteme (Feldmann, 2014, S. 344; Friedmann & Fleischer, 2022, S. 70; Krause & Gebhardt, 2018, S. 5). Die Flexibilität eines Greifers wird über die Anzahl an Aufgaben definiert, die er ohne hardwareseitige Anpassung durchführen kann (Hesse, 2011, S. 149; Monkman, 2007, S. 59). Um dies zu erreichen, existieren in der Praxis verschiedene Ansätze, die sich in die beiden Kategorien „Verwendung von Wechselsystemen“ und „anpassungsfähige Systeme“ unterteilen lassen, und von denen nicht alle

industriell relevant sind (Bartenschlager, Hebel & Schmidt, 1998, S. 107f.; Bauer, 2002, S. 36; Honarpardaz et al., 2016, S. 1; Pham & Yeo, 1991, S. 303ff.).

Die einfachste Möglichkeit, Greifer an geänderte Handhabungsaufgaben anzupassen, ist der **Greiferwechsel** für jede Aufgabe (Bartenschlager, Hebel & Schmidt, 1998, S. 107). Für diesen Ansatz müssen verschiedene Greifer mit unterschiedlichen Wirkelementen vorgehalten werden, die je einen Bereich des gesamten Teilespektrums handhaben können. Die Flexibilität in Bezug auf die Handhabungsaufgabe ist als vergleichsweise hoch zu bewerten, da hier auch verschiedene Greiferarten zum Einsatz kommen können. Nachteilig hingegen ist der damit verbundene, hohe finanzielle und zeitliche Aufwand, da für jedes zu manipulierende Objekt eine Wechselplatte, ein Aktuator und spezielle Wirkelemente benötigt werden (Kramberger et al., 2019, S. 1666; Pham & Yeo, 1991, S. 305).

Bei **Greiferwechselsystemen** sind mehrere Greifer gleichzeitig als Teil des Gesamtendeffektors am Handhabungsgerät befestigt. Durch ein automatisches Einwechseln der einzelnen Greifer kann ein größeres Aufgabenspektrum als bei einem Einzelgreifer abgedeckt werden. Das zusätzliche Gewicht durch mehrere Greifer und die Wechsellösung bindet einen großen Anteil der möglichen Nutzlast der Handhabungseinrichtung, die zusätzlichen Komponenten erhöhen zudem die Störkontur des Endeffektors. Darüber hinaus ist ein solches Gesamtsystem mit erhöhtem finanziellem Aufwand verbunden (Honarpardaz et al., 2016, S. 1; Pham & Yeo, 1991, S. 306).

Nahezu alle industriell eingesetzten Greifer verfügen über eine Schnittstelle zur Montage der Wirkelemente. Dies gilt für mechanische, aber auch für Sauggreifer. Ähnlich zum oben beschriebenen Wechsel des Greifers können mehrere Wirkelemente, bzw. im Falle mechanischer Greifer, Finger vorgehalten und bei Bedarf gewechselt werden. Da der **Greiferfingerwechsel**, genauso wie der Wechsel des Greifers, unproduktiv ist, sollte dieser durch die Verwendung von Schnellwechselsystemen beschleunigt werden. Das ohne Hardwareänderungen handhabbare Teilespektrum ist geringer als bei den Greiferwechselsystemen, jedoch ist der notwendige Platzbedarf zur Lagerung der Wirkelemente geringer (Azim, Lobov & Pastukhov, 2019, S. 415).

Die Verwendung von **Multifunktionsfingern** ermöglicht die Handhabung von mehreren Handhabungsobjekten ohne Greifer- oder Fingerwechsel. Hierdurch kann die Anzahl notwendiger Wechsel reduziert und so die Produktivität gesteigert werden (Honarpardaz et al., 2016, S. 1). Die einfachste Art der Gestaltung von Multifunktionsfingern

ist das Einbringen von werkstückspezifischen Aussparungen in die Wirkflächen der Greiferfinger. Die Anzahl der werkstückspezifischen Teilflächen am Greiferfinger kann entweder gleich der Anzahl der zu greifenden Handhabungsobjekte oder geringer sein. Dieser Ansatz geht einher mit Untersuchungen der Werkstücke, um die Mindestanzahl der Aussparungen zu bestimmen sowie einem hohen Konstruktions- und Programmieraufwand (Pham & Yeo, 1991, S. 304). Mit den werkstückspezifischen Aussparungen wird ein Formschluss erreicht, d.h. die Positionserhaltung des Handhabungsobjekts erfolgt durch eine formgleiche Umschließung von Greiferfinger und Objekt (Hesse, 2011, S. 12). Die Gestaltung solcher Greiferfinger, die für mehrere Werkstücke geeignet sind, ist aktuell noch ein überwiegend manueller Prozess, der in mehreren zeitaufwändigen Iterationen durchlaufen wird (Honarpardaz, 2018, S. 3).

Beim Ansatz der Verwendung **universeller Greifer und Greiferfinger** sind diese so gestaltet, dass sie sich an unterschiedliche Werkstückgeometrien aktiv oder passiv anpassen. Unter der passiven Anpassung werden Wirkelemente verstanden, die sich, z.B. aufgrund einer elastischen Wirkfläche, bei Kontakt mit dem Werkstück an dieses anpassen. Beispiele hierfür sind die Greiferfinger mit Fin Ray Effect®. Die Struktur der Finger ist Fischflossen nachempfunden (siehe Abbildung 2-2), die bei seitlicher Druckeinwirkung nicht in Druckrichtung wegknicken, sondern sich entgegen der einwirkenden Kraft bewegen (Crooks et al., 2016, S. 466).



Abbildung 2-2: Der Fin Ray Effect® zeigt sich bei Einwirkung einer Kraft auf die abgebildete Struktur, indem sich die Seiten der Struktur verbiegen, wodurch sich die Basis und die Spitze in entgegengesetzter Richtung zur Kräfteinwirkung verformen.

Die aktive Anpassung findet überwiegend bei anthropomorphen Greifern statt. Diese der menschlichen Hand nachempfundenen Endeffektoren verfügen über mehrgliedrige, mit Gelenken verbundene Finger, die aktiv gesteuert werden und so grundlegende

Greifmodi der menschlichen Hand imitieren (Pham & Yeo, 1991, S. 306). Aufgrund des enormen mechanischen und steuerungstechnischen Aufwandes solcher Greifer finden sie kaum Anwendung in der Industrie (Birglen, Laliberté & Gosselin, 2008, S. 13; Hesse, 2011, S. 164). Um die Komplexität solcher Greifer zu reduzieren, ohne die Freiheitsgrade der Finger signifikant reduzieren zu müssen, werden Gelenkfingergreifer zunehmend unteraktuiert umgesetzt. Gemeint ist damit, dass die Anzahl der eingesetzten Aktoren niedriger ist als die Anzahl der Freiheitsgrade. Gegenwärtig gibt es zwei Haupttypen unteraktuierter Fingermechanismen, nämlich seilzugbetätigte und gelenkbasierte Mechanismen (Birglen, Laliberté & Gosselin, 2008, S. 14; Ceccarelli, Tavolieri & Lu, 2006, S. 1613). Durch die Anpassung der Finger an die Objektgeometrie nach der Berührung kann es bei unteraktuierten Greifern zu einer signifikanten Rekonfiguration des Hand-Objekt-Systems kommen, die eine ungewollte Objektbewegung zur Folge hat (Gerez, Gao & Liarakapis, 2019, S. 7630).

Die aktive Anpassung an Werkstücke ermöglichen auch sogenannte Softgreifer. Die Finger dieser Greifer bestehen aus elastischem und rutschfestem Material und werden pneumatisch aktuiert. Durch Aufblasen oder Entleeren der Finger werden diese gespreizt oder geschlossen. Aufgrund des flexiblen Materials passen sie sich beim Zugreifen dem zu greifenden Objekt an (Whitesides, 2018, S. 4347). Diese Art von Greifern ist aber aktuell noch sehr wenig verbreitet und daher in der Anwendungshäufigkeit als unbedeutend einzustufen (Hesse, 2020, S. 346).

Die aktive Anpassung an unterschiedliche Werkstücke kann durch Verwendung geregelter Antriebskonzepte unter Verwendung von Sensorik unterstützt werden (Bauer, 2002, S. 36).

2.3 Gestaltung der Greiferfinger

Bei den in der Industrie am häufigsten eingesetzten, mechanischen Greifern wird der Greifzweck durch die mechanische Gestaltung der Fingerkontakte und Fingerspitzen unterstrichen (Carbone, 2013, S. 9). Aufgrund der Tatsache, dass die Finger als einzige Komponente des gesamten Handhabungssystems direkten Kontakt zum Werkstück haben, hängt die Leistungsfähigkeit eines Handhabungssystems maßgeblich von der Funktionsweise der Finger ab (Honarpardaz, 2018, S. 2). Vereinfacht bestehen Greiferfinger aus den drei Elementen Basis, Körper und Fingerspitze. Die Greiferfingerbasis ermöglicht die Anbindung des Fingers an den Greifergrundkörper und stellt die entsprechenden Merkmale bereit. Der Fingerkörper überbrückt die Strecke zwischen

Greifergrundkörper und Greifposition, und über die Fingerspitze wird der Kontakt zum Handhabungsobjekt hergestellt (Schmalz, 2018, S. 74–75). Durch Variation der Fingerbasis, der Fingerlänge, der Auskrägung entlang der und seitlich zur Greifrichtung sowie der Fingerspitze (z.B. Fase) und der Wirkfläche ergibt sich eine hohe Gestaltungsvielfalt, weshalb sich im Laufe der Zeit einige Arten von Greiferfingern sowie Verfahren zur Greiferfingergestaltung entwickelt haben.

2.3.1 Arten von Greiferfingern

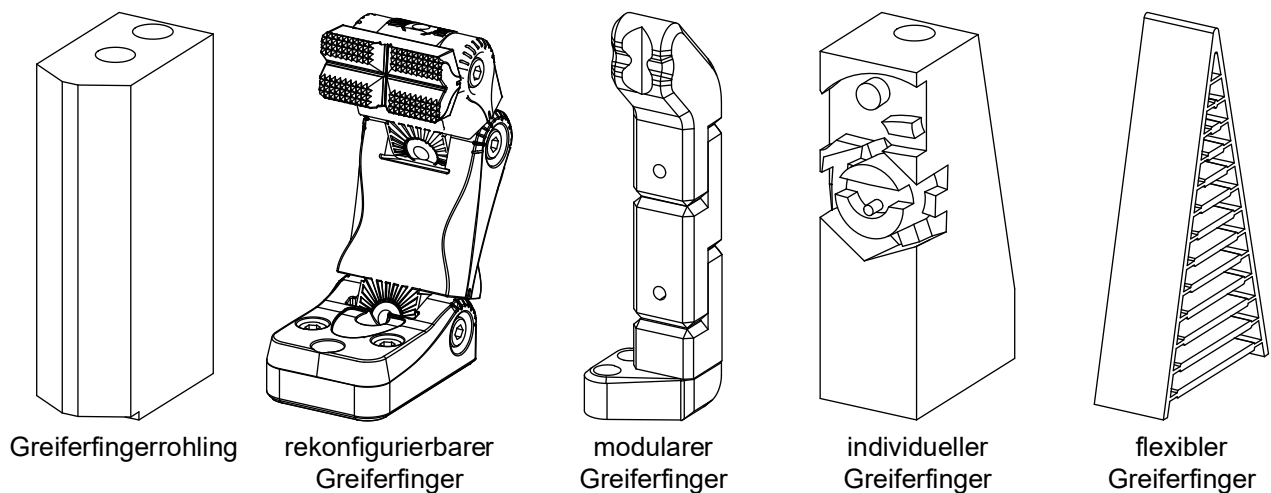


Abbildung 2-3: Übersicht unterschiedlicher Greiferfingerarten (eigene und veränderte Darstellung nach (Friedmann et al., 2023, S. 2))

Abbildung 2-3 gibt eine Übersicht zu den verschiedenen Greiferfingerarten, die im Folgenden von links nach rechts näher beleuchtet werden.

Für eine vereinfachte Erstellung von Greiferfingern bieten viele Greiferhersteller sogenannte **Greiferfingerrohlinge** zur anwenderspezifischen Nachbearbeitung an. Fingerrohlinge bezeichnen Aluminium- oder Stahlquader, deren Maße und Gewicht innerhalb der Herstellerspezifikationen für die Greifer, auf denen die Rohlinge zur Anwendung kommen, liegen. Diese weisen vordefinierte Merkmale wie Ausrichtungsstifte und Schraubenlöcher auf, die mit den entsprechenden Merkmalen auf der Greifergrundbacke übereinstimmen und dort montiert werden können. Greiferfingerrohlinge sind überdimensioniert und erlauben somit eine kundenspezifischen Nachbearbeitung der Wirkflächen (Pott & Dietz, 2019, S. 40; Velasco, 1997, S. 12). Liegen die CAD-Daten der Handhabungsobjekte vor, so können die Fingerrohlinge konstruktiv und in Iterationen an die Geometrie der Handhabungsobjekte angepasst werden. Anschließend müssen die Rohlinge entsprechend der Konstruktion bearbeitet werden.

Rekonfigurierbare Greiferfinger können ohne den Austausch von Komponenten an verschiedene Greifaufgaben angepasst werden, wobei die Anpassung immer vor Durchführung der Aufgabe manuell erfolgt. Die Gestalt der rekonfigurierbaren Finger reicht von simplen Stiften (Abbildung 2-4 a) bis zu mehrgelenkigen Fingern (Abbildung 2-4 b). Für das Spannen von Werkstücken in schraubstockähnlichen Vorrichtungen beispielsweise können zylindrische Stifte verwendet werden, die je nach Form des Handhabungsobjekts anders positioniert sein müssen. Für die Rekonfiguration der Stifte werden Lochplatten verwendet, die eine feste Anzahl an Löchern aufweisen.

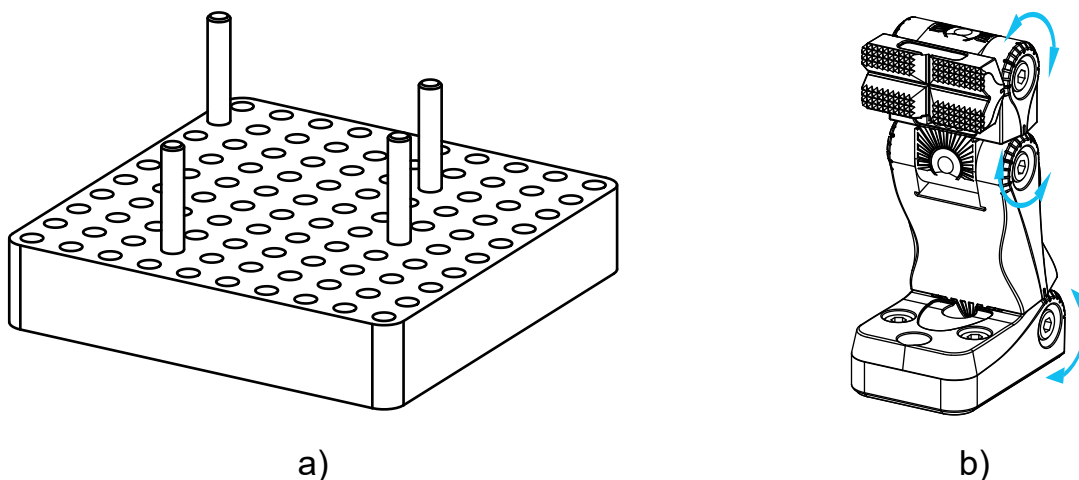


Abbildung 2-4: Ausprägungen rekonfigurierbarer Greiferfinger in Form von Lochplatten mit positionierbaren Stiften (a) und als Finger mit verstellbaren Gelenken

Dieses Prinzip kann auf Parallelbackengreifer übertragen werden (Brown & Brost, 1999, S. 174; Wallack & Canny, 1997, S. 40). Eine andere Art der Rekonfiguration ermöglicht das Click&Grip System von PHD, Inc. Die Finger bestehen standardmäßig aus vier Gliedern. Über drei Gelenke können die Winkel zwischen den Elementen in 15°-Schritten manuell verändert werden. Zusätzlich kann die Basis der Finger auch um 90° gedreht an den Grundbacken des Greifers befestigt werden und ermöglicht so eine Auskrägung quer zur Greifrichtung (PHD Inc., 2020).

In der Literatur werden verschiedene Ansätze der Greiferfingergestaltung als **modulare Greiferfinger** bezeichnet (Abbildung 2-3, mitte). Honarpardaz (2018) fasst unter dem Begriff modularer Greiferfingergestaltungsansätze sowohl Greiferfinger zusammen, die aus Modulen bestehen (z.B. Li, Gu & Ren, 2017) als auch Ansätze, bei denen monolithische Finger als Module des Greifersystems über eine standardisierte Schnittstelle ausgetauscht werden können (z.B. Wolniakowski et al., 2014).

Der Austausch von Fingerelementen oder ganzen Fingern bei Greifern ist sowohl in der Forschung als auch in der industriellen Anwendung weit verbreitet. Die Austauschbarkeit dient in der Regel der Möglichkeit zur Anpassung des Greifers für neue Handhabungsaufgaben. Dabei können Finger durch andere ersetzt (Brandenburg, Smolka & Diltthey, 2004; Eliuk et al., 2008; Pham, Gourashi & Eldukhri, 2007; RightHand Robotics, Inc., 2017; z.B. Tzafestas, 1988; Vittor et al., 2011), oder die Anzahl an Fingern geändert werden (Kakogawa, Nishimura, Hiroyuki & Ma, 2016; Salisbury & Quigley, 2013; z.B. Shufeng, Yue & Wei, 2018). Gerade bei komplexen Greiferfingern mit integrierter Elektronik ist eine Austauschbarkeit zu Wartungszwecken vorgesehen (Asheber & Lin, 2015; Jiang et al., 2014; Jung & Oh, 2013; Kakogawa, Nishimura, Hiroyuki & Ma, 2016; Liu et al., 2007; Liu et al., 2008; Ren et al., 2018; Vagaš & Varga, 2013; Wang et al., 2021; z.B. Weiss & Woern, 2004).

Durch den Austausch, das Hinzufügen oder Entfernen einzelner Elemente kann die Gestalt und Funktion der Greiferfinger an eine Greifaufgabe angepasst werden. Das FiNGERKIT von Weiss Robotics ist ein Baukasten, der in zwei Baureihen verfügbar ist und den Aufbau von Greiferfingern aus standardisierten Modulen ermöglicht. Innerhalb einer Baureihe können die einzelnen, aus Aluminium gefertigten Elemente flexibel miteinander kombiniert werden. Abbildung 2-5 zeigt einen Greifer mit drei beispielhaften Greiferfingerkonfigurationen aus dem Baukasten. Jeder Finger beginnt mit einem von zwei Basiselementen (BE 16-015, BE 16-025), welches die Schnittstelle des Greifers auf die des Baukastens übersetzt, und endet mit einer der beiden Fingerspitzen (FT-16 UNI, FT-16 CR). Dazwischen können Fingerelemente (FE), T-Elemente (TE), Distanzelemente (DP) und Wirkelemente (AC) frei kombiniert werden. Ein Finger besteht damit aus mindestens zwei Elementen, die über zwei Stifte verdrehsicher gegeneinander zentriert und über eine Schraubverbindung verbunden werden. Die Einhaltung der Greiferspezifikationen bei der Gestaltung der Finger obliegt dem Nutzer (Weiss Robotics GmbH & Co. KG, 2019, S. 15, 2024).

Li et al. (2017) beschreiben den Aufbau von Greiferfingern aus Modulen mit jeweils einem Freiheitsgrad. Jedes Modul besitzt eine magnetische männliche und weibliche Schnittstelle zur Kopplung mit anderen Modulen. Der rotatorische Freiheitsgrad kann bei geöffneter Kupplung eingestellt und dann wieder verriegelt werden. Die Finger werden über einen Seilzug, der bei jedem neuen Modul eingehängt werden muss, aktuiert. Die beschriebene Schnittstelle dient alleinig der mechanischen Verbindung, sodass zu

jedem Modul ein separates Kabel gelegt werden muss, um die Kupplung zu öffnen und zu schließen (Li, Gu & Ren, 2017, S. 2758f.).

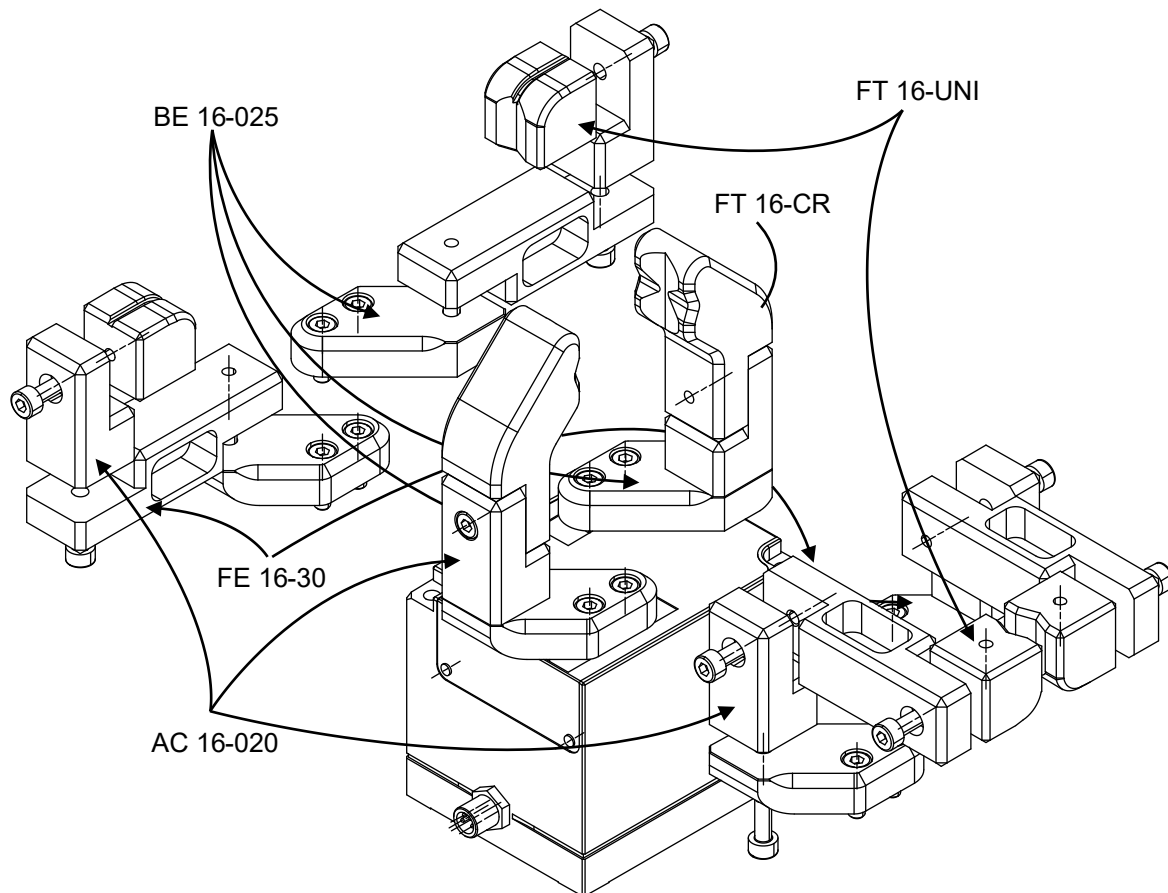


Abbildung 2-5: Weiss Robotics FiNGERKIT mit drei beispielhaften Fingerpaaren und Benennung der einzelnen Module

Basierend auf der Anatomie der menschlichen Hand wird in Li et al. (2019) ein anthropomorpher Greifer mit fünf Fingern, bestehend jeweils aus einem oder mehreren Modulen, beschrieben. Die Anzahl der Module kann je nach den Anforderungen der Greif- und Manipulationsaufgaben schnell angepasst werden. Jedes Modul besteht aus zwei Elementen, die über ein Gelenk miteinander verbunden sind. Als Schnittstelle zwischen den Modulen wird eine Schnappverbindung verwendet. Der Antrieb erfolgt über Seilzüge, die von einem Servomotor ge- und entspannt werden (Li et al., 2019).

Dieser modulare Ansatz erlaubt es, Greiferfinger bis zu einem gewissen Grad an Greifaufgaben anzupassen, ohne komplexe Mechanik und Steuerung und ohne individuelle Anfertigung. Außerdem ergeben sich Vorteile bei der Vielseitigkeit, da die Finger zerlegt und wieder zusammengesetzt werden können, um andere Kombinationen zu bilden, die für neue Aufgaben geeignet sind (Sanfilippo et al., 2012, S. 1281).

Individuelle Greiferfinger werden meist für einen oder wenige Anwendungsfälle definiert, konstruiert und gefertigt. Hochindividuelle Greiferfinger bilden an den Greifpunkten die Geometrie des Werkstücks nach, um die Greifstabilität zu erhöhen (Velasco, 1997, S. 11–12). In diese Kategorie fallen auch alle manuell gestalteten Greiferfinger, die heute noch den Großteil des industriellen Einsatzes ausmachen. Der Gestaltungsprozess solcher Finger läuft in der Regel iterativ ab und ist sehr zeitaufwendig. Darüber hinaus werden fundierte Kenntnisse des robotergestützten Greifens und praktische Erfahrung mit den Konstruktionsmethoden benötigt. Meist wird ein auf Erfahrungswissen basierender Entwurf des Greiferfingers konstruiert, gefertigt und physisch getestet. Notwendige Änderungen resultieren in einer weiteren Iterationsschleife, in der ganze Finger neu gefertigt werden. Additive Fertigungsverfahren, die durch den Verzicht auf bauteilspezifische Werkzeuge oder Formen individuelle Designmöglichkeiten sowohl für Kunststoffe als auch für Metalle bieten, ermöglichen die Verkürzung der obengenannten Iterationszyklen. Aufgrund der hohen Kosten für die Entwicklung individueller Greiferfinger entstanden in Forschung und Industrie zunehmend neue Ansätze zur Automatisierung dieses Prozesses (Wolniakowski et al., 2020, S. 69f.).

Alternativ zur aufgabenspezifischen Fingerentwicklung können auch **flexible Greiferfinger** eingesetzt werden, die sich auf der Basis von Elastomeren passiv an unterschiedliche Greifobjektvarianten anpassen (Whitesides, 2018, S. 4339). Es kann zwischen einer kontaktgesteuerten und einer sehnengesteuerten Verformung unterschieden werden. Kontaktgesteuerte Verformungen von Greiferfingern basieren in der Regel auf dem Fin Ray Effect[®] (s. 2.2.3) (Shintake et al., 2018, 6). In Anlehnung an die menschlichen Finger bestehen sehnengesteuerte, unteraktuierte Greiferfinger aus mehreren starren Gliedern, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Über einen Antrieb im Greifergrundkörper wird ein Seilzug, der entlang des Greiferfingers verläuft und mit der Fingerspitze verbunden ist, gespannt. Über die Seilspannung verformen sich die Finger an den Gelenken und umschließen so die Handhabungsobjekte (Shintake et al., 2018, 7). Flexible Greiferfinger ermöglichen durch die Weichheit des Materials und die mechanische Nachgiebigkeit eine Reduzierung der Steuerungskomplexität (Shintake et al., 2018, 1) und können überall dort eingesetzt werden, wo es nicht um exakte, kraftintensive Manipulationen geht. Aufgrund der geringeren mechanischen Robustheit kommt diese Art von Fingern in der Praxis bisher aber kaum zum Einsatz (Pott & Dietz, 2019, S. 40).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die hier beschriebenen Ansätze sich im Wesentlichen in der Bereitstellungsdauer, der Funktionsintegration und der Werkstückflexibilität unterscheiden. Die Bereitstellungsdauer definiert dabei die Zeit, die zwischen der Entscheidung bzw. Notwendigkeit für neue Greiferfinger und der Verfügbarkeit der Greiferfinger für die Verwendung benötigt wird (A_Gerber, 2020, S. 20).

2.3.2 Automatisierte Bestimmung der Greifposition

Unter Greifpositionsbestimmung, auch **Griffsynthese** genannt, versteht man den Suchprozess zur Identifikation von Griffen an einem Handhabungsobjekt. Ein **Griff** bezeichnet dabei eine Menge von Kontakten auf der Oberfläche eines Handhabungsobjektes, über die Kräfte und Momente von einem Greifsystem auf das Handhabungsobjekt übertragen werden. Zu den beiden wichtigsten Klassen von Griffen zählen formschlüssige und kraftschlüssige Griffe. Ein Griff ist kraftschlüssig, wenn die Wirkelemente des Greifers durch Unterdruck, Reibung, magnetische oder elektrostatische Kräfte eine Bewegung des Handhabungsobjektes, hervorgerufen durch eine externe Störung, verhindern können (Nguyen, 1988, S. 1368; Seegräber, 1993, S. 5). Ein Griff wird hingegen als formschlüssig bezeichnet, wenn durch eine formgleiche Umschließung von Greiferfinger und Handhabungsobjekt eine Positionserhaltung gewährleistet wird (Bicchi, 1995, S. 319; Hesse, 2011, S. 12). Formschlüssige Griffe sind eine Teilmenge der kraftschlüssigen Griffe: Ist ein Objekt durch Punktkontakte so fixiert, dass jede infinitesimale Bewegung durch mindestens einen Kontaktpunkt verhindert wird, so spricht man von einem Formschluss erster Ordnung. Dies entspricht einem Kraftschluss bei reibungsfreien Kontaktpunkten, da dann nur Kräfte entlang der Kontaktnormalen übertragen werden können und eine Bewegung des Handhabungsobjektes nur durch die Anordnung der Kontaktpunkte und ihrer Normalen verhindert werden kann. Formschlüssige Griffe benötigen mehr Kontaktpunkte und werden bei der Ausführung von Kraftgriffen (Power Grasps), d.h. dem großflächigen Umschließen des Handhabungsobjektes zur Übertragung großer Kräfte bei geringer Bewegungsgenauigkeit, verwendet (Siciliano & Khatib, 2016, S. 967–968). Kraftgeschlossene Griffe werden hingegen bei Präzisionsgriffen verwendet bei denen über kleine Kontaktflächen die Greifkraft übertragen wird und eine hohe Bewegungs- und Lagekontrolle erreicht werden kann. Die Art und Größe der vom Finger auf das Handhabungsobjekt übertragenen Kräfte und Momente hängen von dem zugrundeliegenden Fingerkontaktmodell ab. In der Regel werden in der industriellen Handhabung Objekte mittels Präzisionsgriffen

gehandhabt, bei denen nur die Fingerspitzen in Kontakt mit dem Objekt sind (Hesse, 2011, S. 12; Sancho-Bru et al., 2011, S. 218). Bei Präzisionsgriffen werden abhängig von der Geometrie der Kontaktfläche und den Materialeigenschaften der Kontaktpartner drei Kontaktmodelle unterschieden: „Punktkontakt mit und ohne Reibung“ sowie „nicht starrer Punktkontakt mit Reibung“ (siehe Abbildung 2-6) (Siciliano & Khatib, 2016, S. 959).

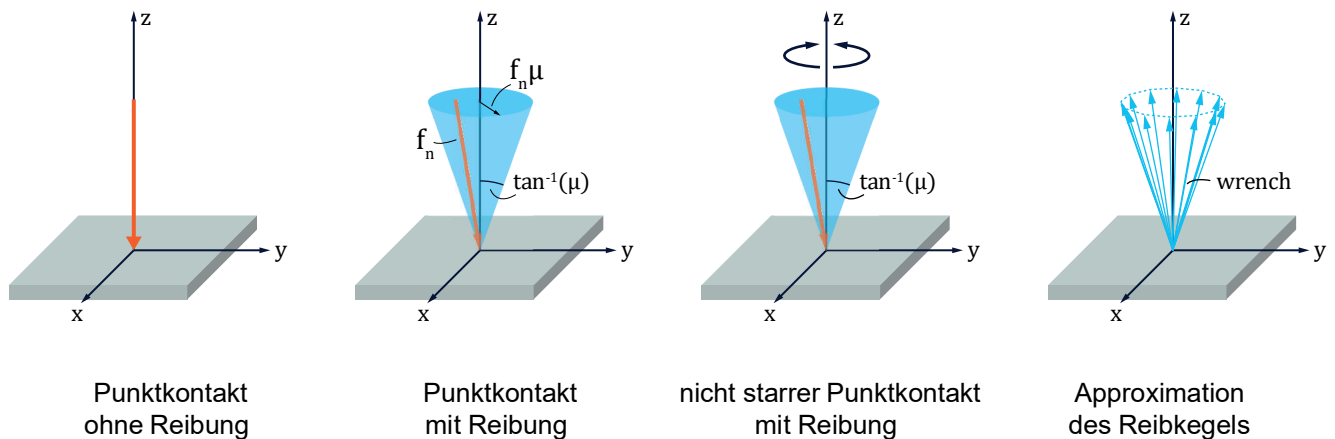


Abbildung 2-6: Fingerkontaktmodelle (eigene und veränderte Darstellung nach (Sancho-Bru et al., 2011, S. 218))

Beim Punktkontakt ohne Reibung können Kräfte nur entlang der Normalenrichtung übertragen werden. Wird zusätzlich Haftreibung berücksichtigt, so können auch tangentiale Kräfte ausgeübt werden, deren maximaler Betrag nach dem Coulomb-Gesetz linear mit der Kraft in Normalenrichtung zusammenhängt. Ein nicht starrer Punktkontakt mit Reibung berücksichtigt darüber hinaus noch ein Drehmoment entlang der Normalenrichtung (Borst, Fischer & Hirzinger, 2003, S. 3693). Zur mathematischen Beschreibung kann der Reibkegel durch den einbeschriebenen Polyeder approximiert werden. Bei den Kontaktmodellen mit Reibung werden über die Kontaktpunkte Kräfte und Momente auf das Handhabungsobjekt übertragen. Die Identifikation der für einen Griff notwendigen Kontaktpunkte kann geometriebasiert, d.h. unter Berücksichtigung von rein geometrischen Informationen des Handhabungsobjekts erfolgen, oder physikalisch basiert, wobei auch auftretende Kräfte und Momente berücksichtigt werden (Siciliano & Khatib, 2016, S. 973).

Allgemein kann ein Griff mittels der sogenannten Wrenches beschrieben werden. Ein Wrench w fasst die in einem Kontaktpunkt wirkenden Kräfte und Momente zu einem Vektor zusammen (Newbury et al., 2023, S. 2):

Für einen planaren Griff: $w = (f_x, f_y, \tau_z)^T \in \mathbb{R}^3$, 2-1

Für einen räumlichen Griff: $w = (f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z)^T \in \mathbb{R}^6$, 2-2

mit dem Anteil der Kraft in x-Richtung f_x , in y-Richtung f_y und in z-Richtung f_z sowie den Momenten um die x-Achse τ_x , die y-Achse τ_y und die z-Achse τ_z .

Die positive lineare Hülle über alle Vektoren aller Wrenches eines Griffs ergeben zusammen den Wrench Space. Da die Kräfte, die über die Kontaktpunkte auf das Handhabungsobjekt übertragen werden können, nicht unendlich groß sind, wird der Wrench Space begrenzt. Die konvexe Hülle über alle Wrenches ergibt den Grasp Wrench Space (*GWS*) (Borst, Fischer & Hirzinger, 2003, S. 3693–3694):

$$GWS = conv(\{w_i\}) = \left\{ \sum_{i=1}^m k_i w_i \mid k_i \geq 0 \text{ und } \sum_{i=1}^m k_i = 1 \right\} \quad 2-3$$

Die Nutzung des *GWS* zur Bewertung des Gleichgewichts- und Stabilitätsverhaltens von Griffen ist weit verbreitet in den Ansätzen der Greifsynthese (z.B. El-Khoury & Sahbani, 2009; Liu, Lam & Ding, 2004; Mahler et al., 2016; Mahler et al., 2017; Mahler et al., 2018; Mahler et al., 2019; Miller & Allen, 2004).

Die Identifikation der Kontaktpunkte ist Aufgabe der Greifsynthese. Die Anzahl bestehender Ansätze für die Greifsynthese ist sehr umfangreich, aber auch unstrukturiert, da kein Ansatz weit verbreitet ist und viele Ansätze nicht detailliert veröffentlicht sind. Zusätzlich fehlt es an Standardobjekten für das Greifen, die einen Vergleich der Ansätze ermöglichen würden. In der Vergangenheit wurden bestehende Ansätze bereits zusammengetragen (z.B. Newbury et al., 2023; Sahbani, El-Khoury & Bidaud, 2012; Shimoga, 1996), weshalb an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur verwiesen wird. Ein Überblick ist nachfolgend wiedergegeben.

Grundsätzlich kann zwischen analytischen und datengetriebenen Ansätzen unterschieden werden. Analytische Ansätze betrachten die Greifpositionsbestimmung als mathematisches Optimierungsproblem, bei dem ein Modell des Problems aufgebaut wird und einige Kriterien wie z.B. ein physikalisches Modell des Handhabungsobjektes oder die Objektgeometrie vorausgesetzt werden. Mit zunehmender Komplexität der Aufgabe steigt zum einen der Modellierungsaufwand und zum anderen der Rechenaufwand für

die Lösungsfindung bei einer Vielzahl von Bedingungen, die für ein erfolgreiches Greifen erfüllt sein müssen. Bei polyedrischen Objekten, also Objekten mit einer endlichen Anzahl von ebenen Flächen, kann jeder Punkt auf einer Fläche durch zwei Variablen linear parametrisiert werden (Newbury et al., 2023, S. 3994–3996). Analytische Ansätze suchen nach Punkten, die auf gegenüberliegenden Seiten eines Handhabungsobjekts liegen und deren Normalenvektoren möglichst in entgegengesetzte Richtungen zeigen (antipodische Punkte) (Chen & Burdick, 1993, S. 507). Haben Objekte sehr viele kleine Flächen, so steigt der Rechenaufwand deutlich an. Solche Objekte werden daher durch 3D-Punktwolken oder ein Netz aus Dreiecksflächen approximiert (Sahbani, El-Khoury & Bidaud, 2012, S. 328). Dem Suchen nach Greifpositionen folgt die Überprüfung der Griffeigenschaften. Für die Analyse der Griffeigenschaften im Vektorraum wird der Reibungskegel durch einen polyedrischen Kegel approximiert (vgl. Abbildung 2-6 rechts). Die konvexe Hülle über alle polyedrischen Kegel ergibt den GWS. Liegt der Ursprung des Handhabungsobjektes (in der Regel der Masseschwerpunkt) im GWS, so ist der Griff kraftschlüssig (vgl. Abbildung 2-7) (Borst, Fischer & Hirzinger, 2003, S. 3693–3694).

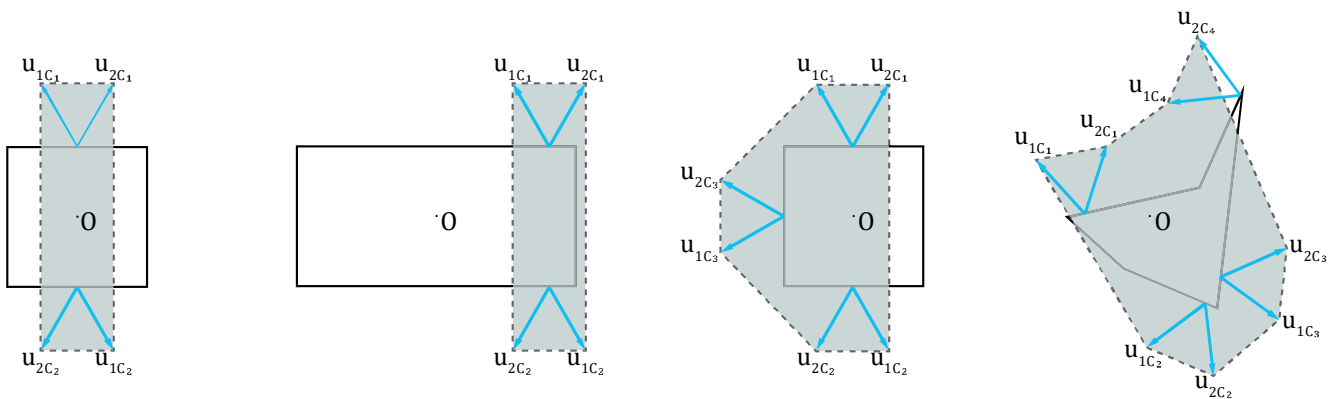


Abbildung 2-7: Möglichkeit zur Überprüfung der Griffeigenschaften mittels GWS. Liegt der Ursprung des Objekts innerhalb des GWS, so ist der Griff kraftschlüssig. Bei den hier dargestellten Griffen ist nur der zweite von links nicht kraftschlüssig.

Während in der Industrie die Handhabungsobjektform und -geometrie sowie die Materialeigenschaften meist bekannt sind, kann dies in anderen Bereichen, wie beispielsweise der Logistik, nicht vorausgesetzt werden (Schmalz, 2018, S. 31). Damit wird die Synthese einer guten Greifposition für einen bestimmten Greifer und ein Handhabungsobjekt zu einem mehrdimensionalen Such- oder Optimierungsproblem mit einer Vielzahl an relativen Greifer-Objekt-Positionen, Gelenkkonfigurationen und

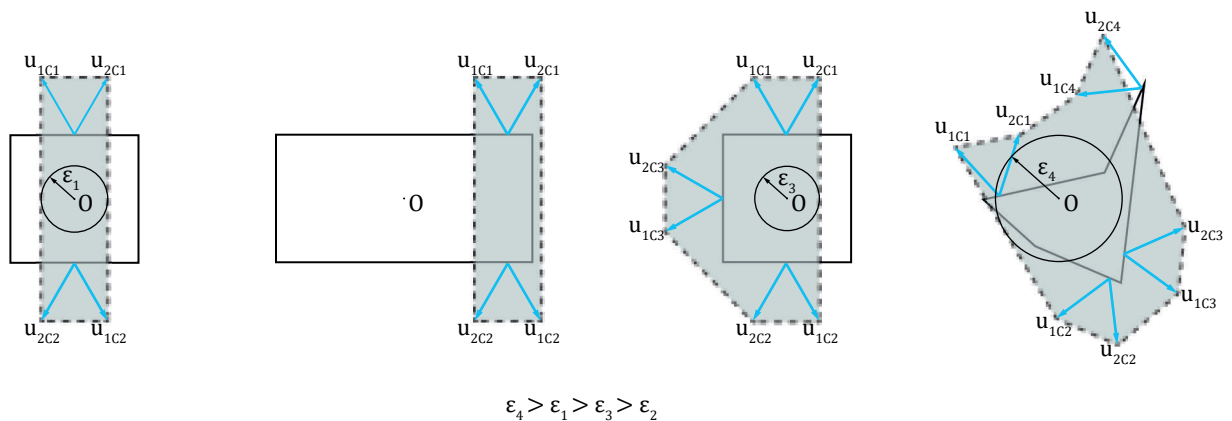
Kontaktbedingungen. Hierfür werden seit einiger Zeit verstärkt datenbasierte Ansätze verwendet, die sich nach Newbury et al. (2023) in vier Kategorien einteilen lassen:

Bei **Sampling**-Ansätzen wird eine Qualitätsschätzungsfunktion gelernt, die die Qualität für einen Satz von Greifpositionen für ein Objekt bewertet. Die richtige Auswahl der Stichprobe bestimmt dabei maßgeblich die Effizienz dieser Ansätze. **Regressionsansätze** betrachten den gesamten Stichprobenraum gleichzeitig und nutzen dies zur Vorhersage von Griffeigenschaften, wie Greifparameter und Greifqualität. Bei den Ansätzen des **Reinforcement Learning** wird versucht, die kumulative Belohnungsfunktion auf der Grundlage von z.B. simulativ durchgeführten Griffen zu maximieren, weshalb hierfür mehrere hunderttausend Griffe benötigt werden. **Exemplarische Methoden** erstellen eine Nachahmungsstrategie und verwenden eine Ähnlichkeitsmetrik, um qualitativ hochwertige Griffe in einer Datenbank zu finden, die die größte Ähnlichkeit zu einem betrachteten Griff aufweisen (Newbury et al., 2023, S. 3997–4002).

Während datenbasierte Ansätze meist sehr zeiteffizient arbeiten und in kurzer Zeit eine große Anzahl an Griffkandidaten ermitteln und bewerten können, liefern analytische Methoden mathematische Garantien für die Eigenschaften eines Griffs, wie z. B. Kraftschluss. Aufgrund ihrer Komplexität sind diese analytischen Ansätze in Echtzeitanwendungen nicht verwendbar (Newbury et al., 2023, S. 3996).

In der Regel erzeugen die vorgestellten Lösungen zur Greifpositionsbestimmung eine große Anzahl von möglichen Griffen. Qualitätsmetriken können diese Lösungsmengen in eine Rangfolge bringen. Sie ermöglichen die absolute, quantitative Bewertung der Güte eines Griffs, den relativen Vergleich zwischen Griffen sowie die Bewertung zur Optimierung der Greifsynthese (Mishra, 1995, S. 139–140; Rubert et al., 2018, S. 320). Je nach Aspekt eines Griffs, der bewertet werden soll, existieren mittlerweile eine Vielzahl an unterschiedlichen Metriken: Einige Metriken beziehen sich auf die algebraischen Eigenschaften der Greifmatrix G (z.B. minimaler Singulärwert) oder berücksichtigen die Verteilung der Kontaktpunkte und die sich daraus ergebende Form und die Fläche des Greifpolygons. Eine weitere Kategorie bilden Metriken, die die wirkenden Kräfte verwenden und solche, die die Konfiguration des Greifers (z.B. Fingergelenkstellung) als Basis verwenden. Darüber hinaus sind Kombinationen verschiedener Metriken in serieller oder paralleler Abfolge möglich. Eine Übersicht zu 24 aktuellen Verfahren ist in (Roa & Suárez, 2015) beschrieben. Unter den verschiedenen Greifmetriken sind diejenigen, die sich auf den GWS beziehen, am weitesten verbreitet (Qiu & Kermani, 2022, S. 2).

Allgemeine Metriken berücksichtigen nicht die Handhabungsaufgabe und liefern allgemeine Informationen zur Stabilität eines Griiffs (Honarpardaz et al., 2017, S. 108). Die bekannteste Methode aus dieser Kategorie, das sog. Ballkriterium, nutzt den größten Wert einer externen Kraft, die auf das Handhabungsobjekt wirkt, und der ein Griff widerstehen kann. Geometrisch betrachtet entspricht dies dem Radius ε der größten, im Ursprung zentrierten Kugel, die sich innerhalb des *GWS* befindet (siehe Abbildung 2-8) (Ferrari & Canny, 1992, S. 2292). Die größte Herausforderung bei der Anwendung dieser Metrik ist die Berechnung der Grenzen des *GWS*, weshalb Möglichkeiten entwickelt wurden, um auf die Berechnung der konvexen Hülle teilweise oder vollständig zu verzichten (z.B. (Liu & Carpin, 2015; Qiu & Kermani, 2022)).



*Abbildung 2-8: Anwendung des Ballkriteriums auf die vier Objekte. Der Radius des Balls wird vom Ursprung aus vergrößert bis die Balloberfläche den äußeren Rand des *GWS* berührt. Der Radius bestimmt die Qualität des Griiffs.*

2.3.3 Automatisierte Greiferfingergestaltung

Die Wirkelemente des Greifers gehören zu den wichtigsten Komponenten eines Handhabungssystems, daher wurde bereits in einigen Forschungsansätzen untersucht, wie der Gestaltungsprozess dieser Wirkelemente unterstützt oder vollständig automatisiert werden kann (Honarpardaz, 2018, S. 16). Nicht für alle der in Kapitel 2.3.1 vorgestellten Greiferfingerarten gibt es Ansätze zur Gestaltungsunterstützung oder -automatisierung. Honarpardaz et al. (2017) geben einen Überblick über die Ansätze, die bis 2017 vorgeschlagen wurden. Sie unterteilen die Forschung im Bereich der automatisierten Greiferfingergestaltung nach den Fingerarten in Ansätze zur Gestaltung modularer, rekonfigurierbarer und individueller Greiferfinger. Die vorliegende Arbeit folgt der gleichen

Kategorisierung, jedoch erfolgt die Zuordnung der Ansätze gemäß der Definition der Greiferfingerarten in Kapitel 2.3.1.

Ansätze zur **automatisierten Gestaltung modularer Greiferfinger** verwenden meist identische Module für den Aufbau von Wirkelementstrukturen, um die Struktur des Greifersystems an eine Greifaufgabe anpassen und damit die Komplexität verringern zu können. Sanfilippo et al. (2012) beschreiben ein Konzept eines mehrfingerigen Greifers mit modular aufgebauten Greiferfingern. Jeder Finger besitzt eine Grundplatte, auf der eine Kette bestehend aus mehreren Modulen mit jeweils einem rotatorischen Freiheitsgrad befestigt werden kann. Die Grundplatten der Finger können miteinander zu einer Greiferstruktur verbunden werden. Mit einem Algorithmus erfolgt die Gestaltung der Finger in iterativen Schritten, um eine Konfiguration zu erhalten, die eine vorgegebene Leistung in Bezug auf die Greifqualität mit der geringstmöglichen Anzahl von Modulen erreicht. Ausgehend von der minimalen Konfiguration mit einem Finger, bestehend aus einem Modul, wird in jeder Iteration ein Modul hinzugefügt. Ist die zuvor definierte maximale Menge an Modulen je Finger erreicht, so werden zwei Finger berücksichtigt. In jeder Iteration werden nacheinander Konfigurationen erzeugt, eine Greifposition bestimmt und die Griffqualität einer Konfiguration mit Hilfe des ε -Kriteriums bewertet. Der Algorithmus stoppt, wenn die gewünschte Griffqualität erreicht ist (Sanfilippo et al., 2012, S. 1284).

Bei den Ansätzen zur **automatisierten Gestaltung rekonfigurierbarer Greiferfinger** bestehen die Finger in der Regel aus denselben Elementen. Manche der im Folgenden beschriebenen Ansätze kombinieren einen Austausch von Komponenten mit einer Änderung der Anordnung. Bei den rein rekonfigurierbaren Fingern können durch eine Änderung der Anordnung die Finger für eine Greifaufgabe angepasst werden. Der Ansatz von Brost und Peters (1996) betrachtet die automatisierte Gestaltung von Haltevorrichtungen. Auf einer Platte mit einem regelmäßigen Raster an genau positionierten Löchern werden passend für ein Objekt zylindrische Stifte so in den Löchern positioniert, dass das Objekt sicher in Position und Orientierung gehalten werden kann. Der Algorithmus setzt voraus, dass vertikale und horizontale ebene Flächen einen wesentlichen Teil der Werkstückbegrenzung ausmachen. Der Algorithmus generiert alle möglichen Stiftpositionskombinationen und bewertet sie dann nach bestimmten Maßstäben.

In Brown und Brost (1999) wird das Prinzip der Lochplatten auf Parallelbackengreifer übertragen. Die Grundbacken des Greifers bestehen dazu aus Platten mit einem regelmäßigen Raster an Löchern. Durch die Positionierung der zylindrischen Stifte in den

Löchern und mit dem Hub des Greifers können auf einfache Weise qualitativ hochwertige Griffe für eine Vielzahl von Handhabungsobjekten erstellt werden. Zur Ermittlung der Stiftpositionen wird ein Algorithmus verwendet, der neben der Position auch die Länge der Stifte, die Erreichbarkeit der Greifposition über den Hub des Greifers sowie die Art des Griffs überprüft.

Der modulare Fingeraufbau für einen unteraktuierten Greifer in (Li, Gu & Ren, 2017) wurde bereits in Kapitel 2.3.1 vorgestellt. Die Finger können über die Anzahl an Modulen pro Finger sowie die Gelenkwinkelstellungen der Module an eine Greifaufgabe angepasst werden. Während die Modulanzahl je Finger von den Autoren auf zwei bis vier festgelegt, aber nicht automatisiert ermittelt wird, kann die Gelenkwinkelstellung automatisiert angepasst werden. Dafür werden die Kupplungen der einzelnen Module nacheinander geöffnet und wieder verriegelt. Nach dem Öffnen wird der Gelenkwinkel soweit verändert bis das jeweilige Modul das Handhabungsobjekt berührt. Dadurch wird das Handhabungsobjekt nach und nach umschlungen (Li, Gu & Ren, 2017).

Die **automatisierte Konstruktion individueller Greiferfinger** zielt darauf ab, für einen Anwendungsfall spezifische Greiferfinger, ohne menschliche Beteiligung, bereit zu stellen. Die Spezifikation des einzelnen Fingers durch Anwendung einer entsprechenden Methode reicht dabei von angepassten Merkmalen, wie einer prismatischen Wirkfläche (z.B. Schmalz, 2018), bis hin zu einer formgetreuen Negativnachbildung des Handhabungsobjekts in der Wirkfläche (Nagel, Giese & Becker, 2016, z.B.). Die Gestaltung individueller Greiferfinger kann regelbasiert erfolgen. Dabei wird versucht, das Domänenwissen des Experten zu formalisieren.

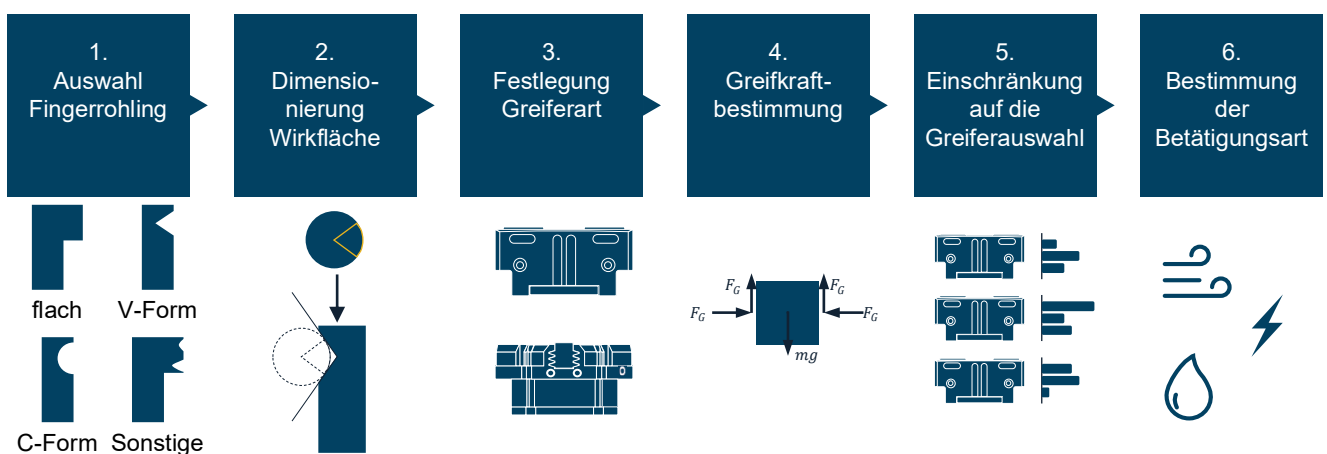


Abbildung 2-9: Regelbasierter Greiferfingerentwurf in sechs Schritten nach (Pedrazzoli, Rinaldi & Bobertoer, 2001)

Dieses kann dann in Form eines Expertensystems einen Anwender unterstützen (Pedrazzoli, Rinaldi & Bobertoer, 2001, S. 202). In (Pedrazzoli, Rinaldi & Bobertoer, 2001) wird ein Vorgehen, bestehend aus den in Abbildung 2-9 dargestellten sechs Schritten, beschrieben:

Zunächst wird ein Fingerrohling mit Wirkfläche vorausgewählt. Hierfür gibt es drei standardisierte Formen und eine Form für abweichende Anforderungen. Die Auswahl erfolgt auf Grundlage der Handhabungsobjekt-Oberfläche an Greifpositionen. Abhängig von den Greifflächen am Handhabungsobjekt erfolgt die Dimensionierung der Wirkflächen des Fingers sowie die Auswahl des Greifertyps. Abhängig von der Kraftübertragung vom Greiferfinger auf das Handhabungsobjekt (z.B. parallele oder zylindrische Flächen) kann die Formel zur Ermittlung der notwendigen Greifkraft ausgewählt werden. Im vorletzten Schritt werden die Randbedingungen für die Greiferauswahl in Bezug auf Greifkraft und Hub ermittelt. Im letzten Schritt wird abschließend die Betätigungsart des Greifers in Abhängigkeit der Greifaufgabe festgelegt (Pedrazzoli, Rinaldi & Bobertoer, 2001).

Der Autor in Schmalz (2018) beschreibt eine Methode zur rechnergestützten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen, bestehend aus Greifergrundkörper und Wirkelementen. Dabei werden sowohl mechanische Zweifingerparallelgreifer und Winkelgreifer als auch Vakuumgreifer betrachtet. Bestandteil der Methode ist die automatisierte Konstruktion, die ebenfalls sechs Schritte umfasst. Schmalz (2018) betrachtet bei der Auslegung nur gerade Greiferfinger mit planen und prismatischen Wirkflächen. Angepasst werden verschiedene Parameter, wie die Fingerlänge, die Fingeraufnahme je Greifer oder der Prismawinkel. Die so ermittelten Greiferfinger werden dann additiv gefertigt. Ein höherer Individualisierungsgrad wird dadurch erreicht, dass die Form des Handhabungsobjekts von der Geometrie des Fingers subtrahiert und so eine Negativform des Handhabungsobjekts im Finger abgebildet wird.

Ein Ansatz mit weiterführender Individualisierung wird in Velasco (1997) beschrieben, um individuelle Greiferfinger für Zweifingerparallelgreifer automatisiert abzuleiten. Dabei werden die Finger zunächst als Quader angenommen, die jeweils auf einer Seite vordefinierte Merkmale wie Schraubenlöcher zur Befestigung an der Greifergrundbacke aufweisen. Von diesen Quadern wird mit Hilfe boolescher Operationen die Geometrie des Handhabungsobjekts abgezogen. Die Methode berücksichtigt bei der Gestaltung der Finger auch die vertikale und horizontale Zugänglichkeit des Werkstücks durch den Greifer. Um die Finger für mehrere Handhabungsobjekte verwendbar zu machen, kann

eine geometrische Überlagerung der betrachteten Handhabungsobjekte zur Ermittlung der Negativform in den Wirkflächen genutzt werden (Velasco, 1997, S. 47).

Der gesamtheitliche Ansatz des „Generic Optimized Finger Design“ (GOFD) erweitert die reine Greiferfingergestaltung um weitere Schritte (siehe Abbildung 2-10).

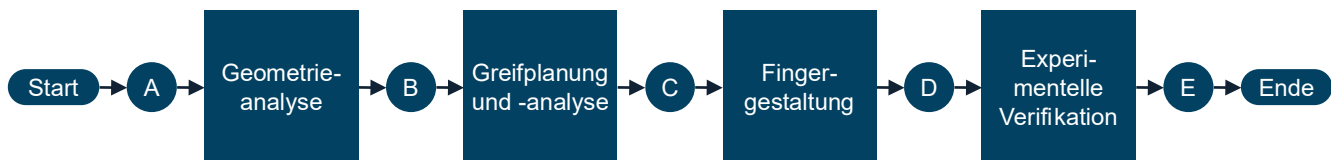


Abbildung 2-10: Ablauf des Generic Optimized Finger Design (eigene Darstellung nach (Honarpardaz, 2018, S. 27))

In der Geometrieanalyse werden die für die Greiferfingergestaltung notwendigen Informationen ermittelt. Über Benutzereingaben legt der Anwender Greifer, Handhabungsobjekte, Materialien, die minimale Greiffläche sowie eine stabile Orientierung der Werkstücke fest. Aus den Materialkombinationen ergeben sich die Reibungskoeffizienten und die minimale Anzahl erforderlicher Kontakte. Parallel dazu werden, in Abhängigkeit von der stabilen Orientierung der Werkstücke und der minimalen Greiffläche, die Flächen für die Greifpositionsbestimmung und die entsprechenden Normalenvektoren ermittelt. In der Greifplanung und -analyse bestimmt ein genetischer Algorithmus die möglichen Greifpositionen. Für eine initiale Population an Griffen berechnet das Verfahren für jeden Griff den GWS und bewertet ihn anhand des ε -Kriteriums. Die jeweils beste Greifposition jeder Population bleibt gespeichert, und der Vorgang wiederholt sich bis zur festgelegten Obergrenze an Populationen. Im Schritt der Fingergestaltung dient schließlich der am besten bewertete Griff als Grundlage (Honarpardaz, 2018, S. 27–28).

Die Fingergestaltung unterteilt sich in die drei Fingerabschnitte Fingerbasis, Fingerkörper und Fingerspitze. Letztere wird, in Anlehnung an das Prinzip von Velasco (Velasco, 1997), an die Geometrie des Handhabungsobjekts angepasst. Bei der Berücksichtigung mehrerer Objekte zur Handhabung wird eine gemeinsame Wirkfläche bestimmt, die für sämtliche Werkstücke geeignet ist. Abhängig von der Größe des Werkstücks und dem gewählten Greifer erfolgt eine Parametrierung des Fingerkörpers hinsichtlich seiner Länge, Breite und Dicke. Nach der Anpassung der Fingerbasis an den spezifischen Greifer wird eine Kollisionsprüfung durchgeführt, bei der sowohl die Finger als auch deren Wechselwirkungen mit dem Werkstück untersucht werden. Abschließend besteht die Möglichkeit, die ermittelte Fingergeometrie durch den Nutzer zu überprüfen.

Die Eignung der Greiferfinger wird experimentell in vier aufeinanderfolgenden Tests validiert. Zunächst erfolgt eine Griffstabilitätsuntersuchung, bei der die maximalen Kraft- und Momentenbelastungen bestimmt werden. In einem Pick-and-Place- sowie einem Montageversuch wird schließlich die Leistungsfähigkeit der Finger evaluiert (Honarpardaz, 2018, S. 25–33).

Bei allen zuvor beschriebenen Ansätzen wird die gesamte Fingerstruktur automatisiert erstellt, was bei wechselnden Aufgaben die Herstellung und immer einen Wechsel der gesamten Finger erforderlich macht. Zur Automatisierung dieses Schritts wurden Finger- und Greiferwechselsysteme eingeführt, die einen automatischen Wechsel der Finger oder des gesamten Endeffektors ermöglichen. Viele Situationen erfordern jedoch nur die Modifikation oder den Wechsel der Fingerspitze, was den Austausch der Greiferfinger oder sogar des gesamten Greifers unwirtschaftlich macht (Ringwald et al., 2023, S. 1). Ansätze für die automatisierte Gestaltung von Fingerspitzen werden in (Ha, Agrawal & Song, 2020; Honarpardaz, Ölvander & Tarkian, 2019; Kramberger et al., 2019; Schroeffler, Rehekampff & Lueth, 2019; Wolniakowski et al., 2020) beschrieben. Dabei kann die individuell gestaltete Fingerspitze fester Bestandteil einer sonst standardisierten Fingerstruktur sein oder sie kann über ein Schnellwechselsystem mit der Fingerstruktur verbunden werden.

2.3.4 Funktionsintegration im Greiferfinger

Neben den in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Ansätzen, die Flexibilität von Greifsystemen zu erhöhen, sodass unterschiedliche Greifaufgaben mit einem System durchgeführt werden können, kann ein Greifer weitere Aufgaben übernehmen, die über das reine Handhaben hinausgehen. Beispiele hierfür sind die Prozess- und Bauteilüberwachung, die integrierte Medienführung oder das Erwärmen und Formen von Halbzeugen, u.a. bei der Herstellung von Faserkunststoffverbunden (Kunz et al., 2015, S. 202; Lachmayer, Rettschlag & Kaierle, 2021, S. 101). Ziel dabei ist es, durch die Integration weiterer Funktionen in die Greifsysteme den Durchsatz und die Effizienz in der Produktion und Montage zu steigern (Causey, 1999, S. 261ff.).

2.3.4.1 Funktionsintegration durch additive Fertigungsverfahren

Die Integration weiterer Funktionen in die Greiferfinger steigert die Komplexität und das Gewicht der Finger. Dieser Zielkonflikt kann durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren bei der Herstellung von Greifer(-teil)systemen gelöst werden: Einerseits erlaubt

diese Art der Herstellung eine Formfreiheit in der Fertigung in Form von z.B. frei platzierbaren Materialverstärkungen im Bauteil, die mit konventionellen Verfahren nicht oder nur unter hohem Aufwand erreichbar ist. Andererseits ermöglicht sie die Funktionsintegration, was beispielsweise ein nachträgliches Fügen von Bauteilen überflüssig macht (Schroeffler, Rehekampff & Lueth, 2019, S. 184f.).

Bei additiven Fertigungsverfahren wird das Werkstück werkzeuglos, element- oder schichtweise aus den unterschiedlichsten Materialien und basierend auf CAD-Daten aufgebaut (VDI 3405:2014-12; Lachmayer, Rettschlag & Kaierle, 2021, S. 1). Durch die vergleichsweise aufwandsarme Arbeitsvorbereitung sowie den Verzicht auf Werkzeuge ermöglichen sie eine wirtschaftliche Herstellung von individuellen Produkten bei kleinen Stückzahlen und großer Variantenvielfalt (Lachmayer & Lippert, 2020, S. 1–3). Zur Realisierung immer individuellerer Handhabungsaufgaben sind immer individuellere Greifer(-finger)geometrien erforderlich. Daher nutzen viele der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Ansätze zur automatisierten Gestaltung individueller Greiferfinger additive Fertigungsverfahren.

Die Funktionsintegration kann z.B. durch das Einbetten von Bauteilen, wie Magneten, im Druckprozess (Shao et al., 2021), das Verwenden unterschiedlicher Materialien zur lokalen Veränderung der mechanischen Eigenschaften (Khondoker, Baheri & Sameoto, 2019) oder auch durch das Erreichen von Fingerstrukturen, die ein Anpassen des Fingers an das Handhabungsobjekt ermöglichen (Ali et al., 2019), erfolgen.

Die Verarbeitung verschiedenster Materialien in additiven Fertigungsverfahren bietet u.a. in der Lebensmittelindustrie die Möglichkeit, Greiferfinger für hygienische Bedingungen und für eine große Vielfalt von Handhabungsobjekten mit den unterschiedlichsten Formen und Oberflächen herzustellen (Blanes, Mellado & Beltran, 2014, S. 205). Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren in der Industrie bewährt sich zunehmend auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, da Modelle und Kleinserien sehr schnell erstellt, getestet und angepasst werden können, bis die serienreife Variante ermittelt ist (Lachmayer & Lippert, 2020, S. 138). Additive Fertigungsverfahren werden bei der Greiferfingergestaltung auch zur individuellen Anpassung des Fingers an ein Objekt genutzt. Dabei kann entweder nur die Greiffläche (Schroeffler, Rehekampff & Lueth, 2019) oder auch die Fingergestalt (Honarpardaz, 2018; Nagel, Giese & Becker, 2016; Schmalz, 2018; Wolniakowski et al., 2020) mit Hilfe additiver Verfahren an das jeweilige Handhabungsobjekt angepasst werden.

2.3.4.2 Funktionsintegration durch Sensorik

Handhabungsprozesse sind nicht wertschöpfend und sollten daher möglichst schnell ablaufen oder weitere (wertschöpfende) Funktionen integrieren (Wolf & Schunk, 2016, S. 17). Durch die Verwendung von Sensoren direkt im Greiferfinger können Informationen über den Greifvorgang, die Umgebung und das Handhabungsobjekt erfasst und beispielsweise für eine Prozessüberwachung oder Regelung genutzt werden. Ähnlich wie beim Menschen, wird bei Greifern versucht sensorische Informationen, die mit dem Seh- und Tastsinn zusammenhängen zu nutzen, um mit Objekten in ihrer Umgebung zu interagieren. Die am häufigsten bei Handhabungssystemen eingesetzten Sensoren sind Kraftsensoren, Distanzsensoren, Kontakt- oder taktile Sensoren und Umgebungssensoren (Friedmann & Fleischer, 2022, S. 70; Tai et al., 2016, S. 2).

Kraftsensoren messen die Kraft, die beim Greifen auftritt, liefern Informationen über die Beschaffenheit des Handhabungsobjekts und helfen, eine Beschädigung des Handhabungsobjekts zu verhindern (z.B. Gerez, Gao & Liarokapis, 2019). Gerade bei Handhabungsaufgaben, die sequenzielle Manipulationen erfordern, kann die relative Position und Orientierung des Handhabungssystems zum Handhabungsobjekt durch die Addition von Fehlern – beispielsweise Steuerungsrauschen oder frühere fehlerhafte Manipulationen – verfälscht sein. Je nach geforderter Präzision können solche Fehler dazu führen, dass die automatisierte Handhabung fehlschlägt. Distanzsensoren messen die Distanz zwischen Greiferfinger und Handhabungsobjekt, um den Greifer mittig oberhalb des Handhabungsobjektes zu positionieren, oder um die Parameter des Greifvorgangs in Handhabungsobjektnähe anzupassen (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung) (Yang, Lancaster & Smith, 2017). Mit Kontaktsensoren wird erfasst, wenn der Greiferfinger in Kontakt mit dem Handhabungsobjekt kommt. Taktile Sensoren liefern komplexere Informationen bei Berührung oder Druck auf einer Oberfläche, die Rückschlüsse auf Intensität und Verteilung des Drucks oder die Form des berührten Objekts zulassen (Wettels, Fishel & Loeb, 2014). Umgebungssensoren ermitteln Informationen zur Umgebung, in der der Greifer eingesetzt wird. So können Kollisionen vermieden werden und der Greifvorgang lässt sich in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen anpassen (Schäfer et al., 2019).

2.4 Produktkonfiguration

Im Kontext eines steigenden Wettbewerbs und einer zunehmenden Individualisierung der Nachfrage sind Unternehmen gezwungen, die eigenen Produkte dahingehend

anzupassen, markante positive Unterscheidungsmerkmale im Vergleich zum Wettbewerb durch Individualisierung für den Kunden sichtbar zu machen (Krug, 2010, S. 18). Hierbei kann die Automatisierung von Konstruktion und Fertigung eine Chance sein, diese Herausforderungen zu bewältigen (Schroeffer, Rehekampff & Lueth, 2019, S. 184).

Für eine kundenindividualisierte (Massen-)Produktion rücken Produktkonfiguratoren als unterstützendes Medium zunehmend in den Fokus, da sie die zulässige Zusammenstellung von Produkten gemäß den Kundenanforderungen auf Basis zuvor definierter Komponenten und Regeln ermöglichen (Liebisch, 2014, S. 2).

Die **Produktkonfiguration** beschreibt das Zusammensetzen von standardisierten Bauteilen, Modulen und Komponenten zu individuellen Endproduktvarianten unter der Einhaltung von Konfigurationsregeln. Bei manueller Durchführung ist die Qualität einer Konfiguration stark von der Erfahrung der durchführenden Person abhängig (Schuh & Riesener, 2018, S. 211). Bei der Auswahl einer Variante, die die individuelle Gesamtheit an Anforderungen möglichst gut erfüllt, muss zudem immer die gesamte Produktarchitektur berücksichtigt werden. Bei immer umfassenderen, variantenreicheren Produktarchitekturen gelten Produktkonfiguratoren als zwingend erforderlich (Laukotka, Seiler & Krause, 2020, S. 66; Plietz, 2011, S. 62).

Für den Einsatz von Produktkonfiguratoren müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein, die sich mit der Modularität des zu konfigurierenden Produkts, der Formalisierung von Abhängigkeiten und der Transformation von Anforderungen zusammenfassen lassen (Liebisch, 2014, S. 13). Die Modularität ist eine graduelle Eigenschaft der Produktstruktur, die sich im Wesentlichen durch die Entkopplung der Module, d.h. den Komponenten die durch bestimmte Gemeinsamkeiten eine logische Einheit bilden, auszeichnet (Krause & Gebhardt, 2018, S. 100). Modulare Produkte zeichnen sich darüber hinaus durch die kommunale Verwendung der Module (Vereinheitlichung von Modulen für den Einsatz in möglichst vielen Produktvarianten), die Kombinierbarkeit der Module (Erstellung verschiedener Produktvarianten durch Kombination der Module), standardisierte Schnittstellen und die Funktionsbindung der Module (Erfüllung einer Teilfunktion oder einer festen Anzahl weniger Teilfunktionen) aus (Krause & Gebhardt, 2018, S. 102–105). Neben der Modularität müssen für den Einsatz von Produktkonfiguratoren die Abhängigkeiten der zu kombinierenden Elemente untereinander beschrieben sein. Erst dadurch wird eine individuelle Zusammenstellung von Produkten gemäß einer definierten Semantik möglich, und inkonsistente oder ungültige Konfigurationen werden

vermieden. Zusätzlich wird durch diese formale Beschreibung der Abhängigkeiten auch implizit vorhandenes, verteiltes Wissen für weitere Personen zugänglich (Liebisch, 2014, S. 14).

Ein Produktkonfigurator agiert als Schnittstelle zwischen Anforderungen und Stückliste. Daher müssen in Vorbereitung zur Verarbeitung dieser Informationen im Produktkonfigurator die Anforderungen in (Teil-)Konfigurationen übersetzt werden. Da mit einem Produktkonfigurator nie alle denkbaren Kundenwünsche mit den möglichen Konfigurationen abgedeckt werden können, müssen die Zusammenhänge zwischen den ermittelten Anforderungen und Produktvarianten abgebildet werden (Liebisch, 2014, S. 15; Seiler, Schwede & Krause, 2019, S. 59). Ein Konfigurator soll den Zielkonflikt zwischen flexibler Kundenwunscherfüllung und dem unternehmensseitigen Streben nach einheitlichen Prozessen, geringerer Anzahl an Einzelteilen, höherer Kommunalität und stabiler Wirtschaftlichkeit lösen. Da nicht alle Produktkonfiguratoren gleich sind, liegt die Unterscheidung hauptsächlich in der Art und Weise, wie ein Produkt nach der Bestellung gefertigt oder angepasst wird. Bei Build to Order (BTO) wird das Produkt erst nach Eingang der Bestellung aus vorgefertigten Komponenten und ohne signifikante Änderungen am Design oder der Konstruktion gebaut. Hierzu zählen beispielsweise Personal Computer, bei denen der Kunde einen Großteil der Komponenten selbst wählen kann. Mehr Flexibilität bieten Make to Order Konfiguratoren (MTO): Ein Produkt wird erst nach Eingang der Bestellung gefertigt, wobei mehr als die Standardoptionen bei BTO verändert werden kann. Eine vollständige Entwicklung oder maßgeschneiderte Anpassung des Produkts ermöglicht das Prinzip Engineer to Order (ETO), wobei dies nur eine sehr eingeschränkte Konfiguration zulässt. Das Zusammenstellen von Greifern aus Standardmodulen entspricht am ehesten Assemble to Order (ATO), bei dem vorgefertigte Teile oder Komponenten (Baukästen) auf Lager gehalten werden und nach Kundenbestellung zu einem fertigen Produkt zusammengebaut werden (Spallek, 2024, S. 10–14).

In Abgrenzung zu Produktkonfiguratoren sind Produkte in **Produktkatalogen** bereits fest definiert, unveränderbar und bei der Anforderung durch den Kunden schon produziert. Eine größere Individualisierung erlauben **Produktdesignwerkzeuge**, bei denen einzelne Produktkomponenten hinsichtlich Anzahl, Kombinationsmöglichkeiten und inhaltlicher Spezifikationen vom Kunden beeinflusst werden können und der Fokus auf der Gestaltfindung des Produktes liegt, während bei der Konfiguration das Produkt aus

vorbestimmten Elementen synthetisiert wird (Liebisch, 2014, S. 12f.; Schmalz, 2018, S. 29).

Das Ergebnis eines Produktkonfigurator kann auf verschiedene Arten bewertet werden: Einerseits kann das Komplexitäts- und Variantenmanagement für die Bewertung berücksichtigt werden, z.B. durch den Einfluss einer Konfiguration auf die Teilevielfalt oder die Montagekomplexität (Forza & Salvador, 2002). Ein Konfigurationsergebnis kann aber auch wirtschaftlich hinsichtlich der damit verbundenen Kosten (Montage, Einzelteile, Lieferzeit) bewertet werden (Haug, Hvam & Mortensen, 2011). Ein Konfigurator stellt zudem sicher, dass die Funktionalität des Endprodukts gewährleistet ist (Blazek, 2023, S. 181). Damit ist die Produktqualität eine weit verbreitete Dimension zur Bewertung von Konfigurationsergebnissen, z.B. anhand der technischen Gültigkeit von Konfigurationen oder dem mit einer Konfiguration verbundenen Montageaufwand. Während die technische Gültigkeit anhand der Einhaltung von Konfigurationsregeln und Randbedingungen überprüft werden kann, müssen zur Berücksichtigung von Aufwänden, wie dem Montageaufwand einer Konfiguration, Montageaufwandswerte zur Verfügung stehen. Als etablierte Methode zur Bewertung manueller Montagetätigkeiten gilt das MTM (Methods-Time Measurement). MTM ist eine Arbeitsstudienmethode, die verwendet wird, um den Zeitaufwand für die Durchführung von Arbeitsvorgängen zu messen und zu analysieren. Es basiert auf der Zerlegung von Arbeitsschritten in standardisierte Elementarbewegungen. Je nach zu analysierender Tätigkeit können verschiedene MTM-Bausteinsysteme verwendet werden, die alle auf dem MTM-Grundverfahren (MTM-1) basieren. MTM-1 definiert die fünf aufeinanderfolgende elementaren Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen. Diese reichen aus, um durch ihre Kombination den größten Teil der Tätigkeiten in der industriellen Fertigung und Montage zu beschreiben. Anschließend können den Grundbewegungen Zeiten zugeordnet werden (Lotter, Deuse & Lotter, 2016, S. 198). Die Zeiten können sogenannten Normzeittabellen entnommen werden, die das Ergebnis einer umfangreichen Sammlung von Bewegungsanalysen und Zeitmessungen sind und werden in Time Measurement Units (TMU) angegeben, wobei 100.000 TMU einer Stunde bzw. eine TMU 0,036 Sekunden entsprechen (Lotter, Deuse & Lotter, 2016, S. 198; Syska, 2006, S. 99). MTM dient dazu, die Effizienz von Arbeitsabläufen zu verbessern und eine standardisierte Grundlage für die Berechnung von Arbeitszeiten und die Optimierung von Prozessen zu schaffen.

2.4.1 Produktkonfiguration in der Greiftechnik

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, ist die automatisierte Greiferfingergestaltung Gegenstand der Forschung, wobei das Vorgehen zur Erreichung anwendungsgerechter Greiferfinger im Fokus steht. Darüber hinaus gibt es bereits einsatzfähige Produktkonfiguratoren in der Greiftechnik. So nutzen die Hersteller Schunk, Festo, Fairlane Products, Zimmer Group, Harvestance und Schmalz bereits webbasierte Konfigurationslösungen, um das Wissen zu bereits realisierten Lösungen für neue Anwendungen zu nutzen sowie den Anwender bei der Auswahl und Gestaltung aus dem Sortiment zu unterstützen.

Mit dem „Auslegungstool Greifen“¹ (SCHUNK), der „Greifer-Dimensionierung“² (Festo) und dem „Produktfinder“³ (Zimmer Group) können durch Eingaben des Anwenders, wie Einsatzfall, gewünschter Greifertyp, Werkstückinformationen, externe Prozesskräfte oder Bewegungszyklen, die Produktportfolios der Hersteller gefiltert und gültige Greifer ausgewählt werden. Die Software CADGrip⁴ der SCHUNK Tochter AGS Automation Greifsysteme Schwabe GmbH ermöglicht die Konfiguration von Greifern aus Elementen des Greiferbaukastens. Je nach ausgewähltem Kopplungspunkt eines Elements, kann nur aus zulässigen Anbauelementen gewählt werden.

Aufgrund der Vielfalt an Handhabungsaufgaben zielen viele verfügbare, rechnergestützte Gestaltungsapplikationen auf die individuelle Gestaltung der Wirkelemente ab und fallen damit in die Kategorie der Designwerkzeuge. Beispiele hierfür sind der iglidur Designer⁵ von igus oder das nicht mehr angebotene eGrip von SCHUNK, wobei der iglidur Designer nur die Bestellung additiv gefertigter Teile ermöglicht, und die Gestaltung dem Besteller obliegt. Der Gestaltungsprozess bei eGrip beginnt mit dem Hochladen einer STL-Datei⁶ eines Handhabungsobjektes sowie der Angabe grundlegender Parameter, wie dem Greifertyp, Material, Objektgewicht, Fingerlänge sowie Lage und Orientierung des Objekts relativ zum Greifer (Nagel, Giese & Becker, 2016, S. 457f.). Die Greiferfinger werden dann, wie in Velasco (1997) beschrieben, automatisch ermittelt, indem von Quadern mit Hilfe boolescher Operationen die Geometrie des

¹ <https://calc.schunk.com/calc-g-frame-prod/?lang=de&country=DE>, zuletzt geprüft am 04.04.2024

² <https://www.festo.com/x/gripper-sizing>, zuletzt geprüft am 04.04.2024

³ <https://www.zimmer-group.com/de/service/pre-sales/produktfinder/greifer>, zuletzt geprüft am 04.04.2024

⁴ https://inside.ags-automation.de/KundenPortal/Modul_Produktkatalog_AGS/product_tasks.aspx?Kategorie=4211, zuletzt geprüft am 04.04.2024

⁵ <https://iglidur-designer.igus.tools/>, zuletzt geprüft am 04.04.2024

⁶ STL steht für Standard Tessellation Language, die als Dateiformat nur die Oberflächengeometrie eines dreidimensionalen Objekts mittel Tesselierung beschreibt

Handhabungsobjekts abgezogen wird. Die verbleibende Geometrie wird mit einem additiven Fertigungsverfahren in ein physisches Objekt gewandelt und dieses dann an den Kunden versandt. Der Gestaltungsansatz von „eGrip“ ahmt damit jedes Detail auf der Oberfläche des Handhabungsobjektes nach, was dazu führt, dass das Objekt immer exakt gegriffen werden muss.

Eine ähnliche Vorgehensweise, bei der eine begrenzte Geometrievarianz mit festgelegten Parametern individualisiert wird, ist in den Greiferfingerkonfiguratoren FGR⁷ von SCHUNK und GripShape⁸ von Fairlane umgesetzt. Ziel dieser Applikationen ist es, unikale Greiferfinger so zu fertigen, dass diese in Bezug auf Lieferzeit und Herstellkosten mit Standardkomponenten von der Stange konkurrieren können. Die Anwendungen unterstützen den Anwender bei der Erstellung und Beschaffung individueller, additiv gefertigter Greiferfinger: Über eine Upload-Funktion kann der Anwender die CAD-Daten der Handhabungsobjekte bereitstellen, anschließend den Greifer, den Anwendungsbereich und das Herstellungsverfahren sowie das Material und abschließend, je nach Applikation, verschiedene Nachbearbeitungsschritte wählen. Die so entworfenen Finger können in einer 3D-Ansicht betrachtet und direkt mit einigen Tagen Lieferzeit bestellt werden.

Sauggreifer können mit GriPalm⁹ von Harvestance aus vorhandenen Komponenten konfiguriert werden. Der für den Sauggreifer SLG von Schmalz verfügbare SLG-Konfigurator¹⁰ bildet eine Kombination aus Designwerkzeug und Konfigurator ab: Größe, Gewicht und Anzahl der Werkstücke kann individuell festgelegt werden. Der Nutzer wählt dann die Applikation sowie den Sauggreifertyp, -durchmesser und -anzahl. Er erhält einen Vorschlag für die Position jedes Sauggreifers, die der Anwender anschließend verändern kann. Jeder Sauggreifer wird über eine Trägerstruktur mit integrierter Luftleitung mit einem zentralen Anschluss des Greifers verbunden. Die Auswahl von Vakuum-Erzeugung und Anbindung zum Handhabungsgerät erfolgt dann wieder aus festgelegten Elementen.

Die individuelle Gestaltung und Herstellung von Greiferfingern auf Grundlage der zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannten Anforderungen wirkt sich negativ auf die

⁷ <https://schunk.com/de/de/konfigurator-fgr>, zuletzt geprüft am 04.04.2024

⁸ <https://www.gripshape.com/>, zuletzt geprüft am 04.04.2024

⁹ <https://gripalm.com/>

¹⁰ <https://www.schmalz.com/de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/flaechengreifsysteme-und-endeffectoren/leichtbaugreifsysteme-slg/>

Flexibilität dieser Greiferfinger aus. Änderungen in den Anforderungen, z.B. minimale Änderungen an einzelnen Handhabungsobjekten, führen zu neuen Aufwänden in der Gestaltung, der Herstellung, Bereitstellung und Montage der Wirkelemente. Aufgrund der in vielen Fällen monolithischen Struktur der Greiferfinger können diese weder für neue Werkstücke noch in Kombinationen mit anderen Greifern verwendet werden. Ein modularer Aufbau hingegen würde die Herstellung, die Montage sowie Änderungen und mögliche Reparaturen der Greiferfinger erleichtern, was sich wiederum positiv auf die Herstellungs- und Wartungskosten auswirken und gleichzeitig die Anpassungsfähigkeit und Vielseitigkeit der Greiferfinger verbessern würde.

2.4.2 Methoden der Modularisierung

Für die Anwendung eines Produktkonfigurators ist eine modulare Produktstruktur zwingend erforderlich. Das Ziel der Modularisierung liegt in der Entwicklung einer idealen, modularen Produktstruktur. Ideal bedeutet in diesem Zusammenhang nicht nur optimal hinsichtlich der Struktur des Produktes, sondern auch hinsichtlich der erreichbaren Angebotsvielfalt sowie hinsichtlich der zugrunde liegenden Prozesse und Ressourcen, möglichst in allen Phasen des Produktlebenszyklus. Vereinfacht soll die vom Kunden gewünschte externe Varianz mit einer möglichst minimalen internen Varianz erreicht werden (Krause & Gebhardt, 2018, S. 128; Renner, 2007, S. 5). In vielen Unternehmen sind die Prozesse in der frühen Phase der Produktentstehung nicht oder kaum definiert, sodass die Gestaltung einer übergeordneten (modularen) Produktarchitektur meist intuitiv erfolgt (Schuh, 2015, S. 3; Schuh & Riesener, 2018, S. 99). Um dies methodisch zu erreichen, existieren bereits vielfältige Ansätze, die sich nach dem Fokus des Modularisierungsansatzes unterscheiden lassen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen dieser Arbeit nur auf die Ansätze eingegangen wird, die für die spätere Entwicklung des modularen Greiferfingerbaukastens relevant sind. Für weiterführende Informationen sei auf die Literatur verwiesen, z.B. (Krause & Gebhardt, 2018).

2.4.2.1 Modularisierung mit technisch-funktionalem Fokus

Diese Art der Modularisierung stellt die von einem Produkt zu erfüllenden Funktionen ins Zentrum der Modulbildung. Generisch betrachtet werden, ausgehend von einer Dekomposition der von einem Produkt zu erfüllenden Gesamtfunktion, Teilfunktionen Funktionsträgern zugeordnet und dann mehrere Funktionsträger unter der

Berücksichtigung verschiedener Gesichtspunkte zu Modulen zusammengefasst (Krause & Gebhardt, 2018, S. 184). Die im Folgenden beschriebenen Ansätze weisen dabei unterschiedliche Detaillierungsgrade auf.

Einen intensiven Fokus auf die Kopplungen zwischen Produktkomponenten als Grundlage für die Modulbildung, legt das dreischrittige Verfahren der **Integration Analysis Methodology** für die Entwicklung von Produktarchitekturen nach Pimmler und Eppinger (1994). Es umfasst das Zerlegen eines Gesamtsystems in Elemente, das Dokumentieren der Wechselwirkungen zwischen den Elementen und das Clustern der Elemente in Blöcke (Pimmler & Eppinger, 1994, S. 3). Bei der Zerlegung des Gesamtsystems in Elemente wird entweder eine Produktstruktur, eine Funktionsstruktur oder eine Mischung aus Produkt- und Funktionsstruktur in Elemente verschiedenen Detaillierungsgrades erzeugt. Die Detailebene sollte eine Stufe unter der für die Produktarchitektur angestrebten liegen (Pimmler, 1994, S. 18). Wird beispielsweise eine Produktarchitektur auf Subsystemebene angestrebt, so erfolgt eine Zerlegung bis auf die Ebene der Elemente. Ziel ist es dabei, die Interaktionen zwischen den Elementen zu betrachten, bevor man sie in größeren Clustern zusammenfügt. Das ermöglicht eine bessere Kontrolle und verhindert, dass kritische Wechselwirkungen übersehen werden (Pimmler, 1994, S. 17). Der Zerlegung folgt im zweiten Schritt eine Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den ermittelten Elementen. Diese richtet sich nach dem aktuellen Wissensstand und muss bei zunehmendem Wissen überprüft werden. Je nach Gestaltungsaufgabe werden die Wechselwirkungen für verschiedene Wechselwirkungsarten ermittelt. Die Autoren geben die vier generischen Wechselwirkungsarten „räumlich“, „energetisch“, „informationstechnisch“ und „stofflich“ an.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Element 1 | E1		2 0 0 2	2 0 0 -2	2 -2 0 -2	0 0 0 0	0 0 0 0
Element 2 | E2	2 0 0 2		2 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
Element 3 | E3	2 0 0 -2	2 0 0 0		1 0 0 0	0 0 0 0	-2 2 0 0
Element 4 | E4	2 -2 0 -2	0 0 0 0	1 0 0 0		2 0 0 0	2 0 0 0
Element 5 | E5	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	2 0 0 0		0 0 0 0
Element 6 | E6	0 0 0 0	0 0 0 0	-2 0 0 2	2 0 0 0	0 0 0 0	

Legende:

Räumlich	Energie
R	E
I	M
Information	Material

Skala:

-2	-1	0	1	2
schädlich				erforderlich

Abbildung 2-11: Beispiel einer Design Structure Matrix (eigene und veränderte Darstellung nach (Krause & Gebhardt, 2018, S. 188))

Mit Hilfe einer Fünf-Punkte-Skala, die von „schädlich“ bis „erforderlich“ reicht, werden die Wechselwirkungen zwischen den Elementen quantifiziert und ermöglichen so eine Aussage über die relative Notwendigkeit für jeden Interaktionstyp. Die Bewertung der Wechselwirkung und deren Analyse erfolgt im Wesentlichen mit einer veränderten **Design Structure Matrix (DSM)** nach (Steward, 1981) (s. Abbildung 2-11).

Darin werden alle Elemente immer paarweise hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen in den vier Wechselwirkungsbereichen untersucht, sodass jedes Matrixelement vier Einträge enthält. Im letzten Schritt werden dann die Elemente in den Zeilen und Spalten der Matrix rechnergestützt neu sortiert, um die positiven Elemente näher an der Diagonale anzuordnen. Dadurch entstehen Blöcke in der Matrix, die wiederum als Vorschläge für die späteren Module verwendet werden können. Wechselwirkungen, die keinem Cluster zugeordnet werden können, kennzeichnen kritische Punkte, die bei der Gestaltung der Produkte besonders betrachtet werden sollten (Pimmler, 1994, S. 27f.; Pimmler & Eppinger, 1994, S. 8). Als wichtige Vertreter zum rechnergestützten Clustern der DSM sind hier der Idicula-Gutierrez-Thebeau Algorithmus (IGTA) und der Cambridge Advanced Modeller 2¹¹ zu nennen. Während der Cambridge Advanced

¹¹ Verfügbar unter <https://camtoolkit.eng.cam.ac.uk/>

Modeller 2 als abgeschlossene Software zur Verfügung steht, gibt es den IGTA-Algorithmus nach Thebeau als Matlab-Implementierung¹². Der IGTA-Algorithmus verschiebt DSM-Elemente zwischen Clustern und ermittelt, ob die Gesamtänderung eine Verbesserung darstellt. Mit dem Algorithmus wird versucht, die folgenden Werte zu minimieren. Deshalb wird mit einer Analogie zu Kostenwerten gearbeitet, wobei ein hoher Kostenwert einer schlechten Lösung (ineffiziente Clusterbildung) und ein niedriger Kostenwert einer guten Lösung (effiziente Clusterbildung) entspricht.

Der Algorithmus wählt nach dem Zufallsprinzip ein DSM-Element aus einem bestehenden Cluster aus und versucht zu ermitteln, ob es ein anderes Cluster gibt, in das die Komponente besser passt. Für jedes Cluster wird dafür ein ClusterBid ermittelt und das DSM-Element wird in das Cluster mit dem höchsten ClusterBid verschoben (Thebeau, 2001, S. 27–34).

$$ClusterBid_j = \frac{(inout)^{powdep}}{(ClusterSize_j)^{powbid}} \quad 2-4$$

mit *inout* für die Summe der Abhängigkeiten in der DSM zwischen dem gewählten Element und allen anderen Elementen im Cluster *j*, *powdep* für die Betonung der Abhängigkeiten, *ClusterSize_j* für die Anzahl der Elemente im Cluster *j* und *powbid* für die Regulierung der Clustergrößen.

Mit der Größe *TotalCost* wird ermittelt, ob die neue Clusterkonstellation besser ist als alle zuvor gefundenen.

$$TotalCost = \sum IntraClusterCost + \sum ExtraClusterCost \quad 2-5$$

mit *IntraClusterCost* für die Kosten der Abhängigkeiten innerhalb eines Clusters und *ExtraClusterCost* für die Kosten der Abhängigkeiten nach außerhalb eines Clusters. Die Parameter *IntraClusterCost* und *ExtraClusterCost* werden nach folgenden Formeln ermittelt.

$$IntraClusterCost = (DSM(j, k) + DSM(k, j)) \cdot ClusterSize(y)^{powcc} \quad 2-6$$

¹² Verfügbar unter <https://dsmweb.org/matlab-macro-for-clustering-dsms/>

$$\text{ExtraClusterCost} = (\text{DSM}(j, k) + \text{DSM}(k, j)) \cdot \text{DSMSize}^{\text{powcc}} \quad 2-7$$

mit $\text{DSM}(j, k) + \text{DSM}(k, j)$ für die Abhängigkeit zwischen den Elementen j und k der DSM, $\text{ClusterSize}(y)$ für die Anzahl der Elemente im Cluster y , powcc für Beschränkung der Clustergröße, DSMSize für die Gesamtanzahl der DSM-Elemente. Um das Risiko lokaler Optima zu verringern, wird stochastisches Hill-Climbing verwendet, bei dem mit Hilfe der Zufallsvariablen randBid und randAccept zufällige Änderungen – gemäß zuvor festgelegter Regeln – zugelassen werden. Der IGTA erlaubt die Zuordnung von DSM-Elementen zu verschiedenen Clustern (Thebeau, 2001, S. 27–34).

Die beschriebene Vorgehensweise ermöglicht eine strukturierte Herangehensweise an die Modulbildung und liefert dank der rechnergestützten Auswertung schnell Ergebnisse. Je nach Auswahl des Auswertungsalgorithmus können mehrere Durchläufe für eine verlässliche Ermittlung der Module erforderlich sein.

Das zu Beginn von Kapitel 2.4.2 genannte Ziel der Modularisierung, nämlich das Erreichen einer möglichst großen externen Vielfalt an Produkten mit einer möglichst geringen internen Vielfalt an Komponenten, wird mit dem Begriff der Variantengerechtigkeit beschrieben. Während mit den zuvor in diesem Abschnitt beschriebenen Methoden eine Zerlegung in Module erreicht werden kann, wird mit Methoden zur Steigerung der Variantengerechtigkeit versucht, Module in Standard- und Variantenkomponenten zu klassifizieren. Standardkomponenten sind Teil jeder Produktvariante, während Variantenkomponenten optional oder in unterschiedlicher Anzahl in den Produktvarianten enthalten sein können (Krause & Gebhardt, 2018, S. 118).

Eine der bekanntesten Methoden zur Steigerung der Variantengerechtigkeit ist die **Methode der variantengerechten Produktgestaltung** nach (Kipp, 2012). Diese unterstützt den Anwender einerseits in der Visualisierung der Ursachen interner Komplexität, aber auch bei der Definition der Varianten und Standardkomponenten auf der Funktions-, Wirkprinzip- und Komponentenebene. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Schritte, die in Abbildung 2-12 dargestellt sind.

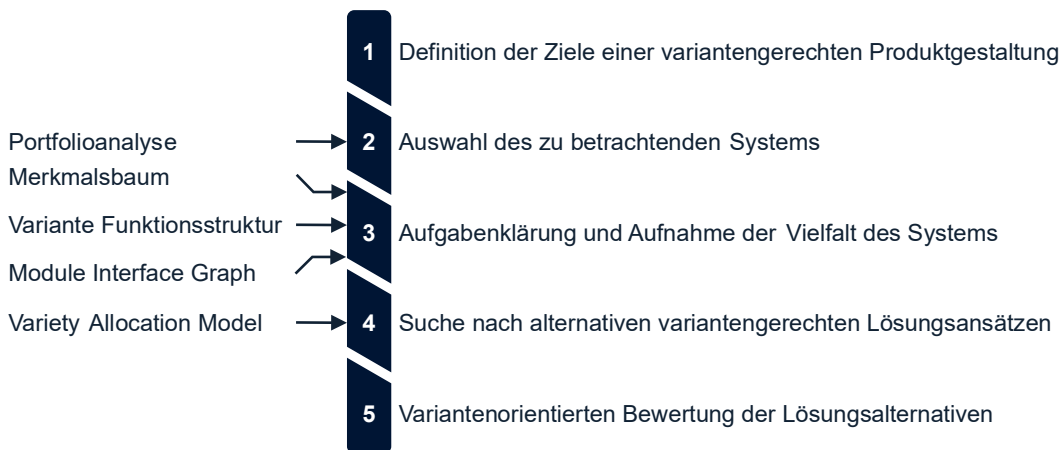


Abbildung 2-12: Vorgehen der Methode der variantengerechten Produktgestaltung nach Kipp (eigene und veränderte Darstellung nach (Kipp, 2012, S. 74))

Die Ziele der Vorgehensweise werden im ersten Schritt festgelegt und leiten sich aus dem von Kipp definierten Idealbild variantengerechter Produktfamilien ab: Dieses zeichnet sich aus durch eine vollständige Differenzierung der Produktstruktur in Standard- und Variantenkomponenten (Differenzierung), eine Reduzierung varianter Komponenten auf die Abbildung von Unterscheidungsmerkmalen (Reduzierung), die Zuordnung von Variantenkomponenten eins-zu-eins zu Unterscheidungsmerkmalen (eins-zu-eins-Zuordnung) und eine Produktstruktur mit geringer Anzahl standardisierter Schnittstellen (Entkopplung) (Blees, 2011, S. 78–79; Kipp, 2012, S. 63–71). Im ersten Schritt ermittelt der Anwender die Probleme der Vielfalt, die mit der variantengerechten Produktgestaltung gelöst werden sollen. Mit Hilfe von Portfolioanalysen wird das System ausgewählt, das variantengerecht(er) gestaltet werden soll (Kipp, 2012, S. 79). Durch die Aufnahme der Vielfalt des Systems im dritten Schritt sollen Schwachstellen im bestehenden Produkt im Hinblick auf die Variantenbeherrschbarkeit ermittelt werden. Hierzu wird das sogenannte Variety Allocation Model genutzt. Das VAM (s. Abbildung 2-13) visualisiert die Varianz von kundenrelevanten Eigenschaften (Unterscheidungsmerkmalen), Funktionen, Wirkprinzipien und Komponenten sowie ihre Zuordnungen untereinander in vier Ebenen, wobei der Konkretisierungsgrad von der obersten zur untersten Ebene zunimmt. Auf der obersten Ebene der Unterscheidungsmerkmale wird ein Merkmalsbaum erstellt, dessen Spalten die Ausprägungen der Unterscheidungsmerkmale, d.h. die Ausprägungen der aus Kundensicht relevanten Anforderungen beschreiben. Für jedes Unterscheidungsmerkmal wird eine Merkmalskarte erstellt, die das jeweilige Unterscheidungsmerkmal beschreibt und hinsichtlich der Relevanz für die Kaufentscheidung der Kunden und die Anzahl der Ausprägungen bewertet. Der Merkmalsbaum bildet den typischen Entscheidungsprozess des Kunden ab, indem die

Merkmale in einer abnehmenden Relevanz für den Kunden von links nach rechts sortiert werden (Kipp, 2012, S. 80–83).

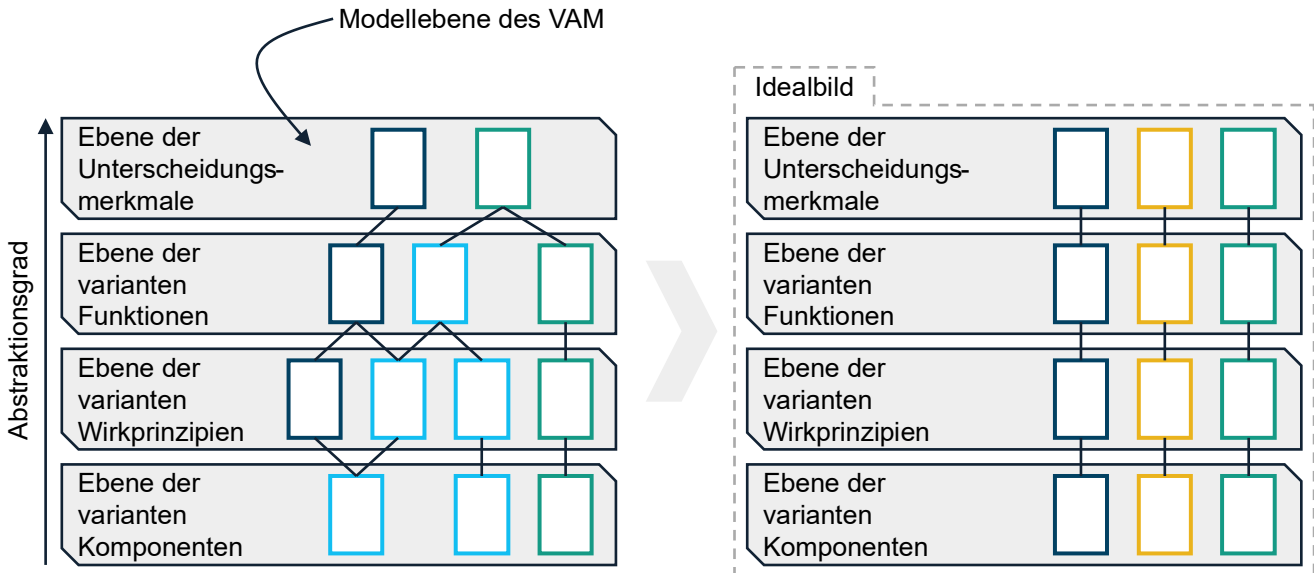


Abbildung 2-13: Abstrakte Darstellung des Variety Allocation Modells nach Kipp (2012) (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 41))

Neben der Relevanz kann die Merkmalskarte auch die Vielfalt eines Merkmals im Baum in Form einer Balkenbewertung in drei Ausprägungen ausweisen (s. Abbildung 2-15 a) (Kipp, 2012, S. 81–83). Jeder Karte jeder Ebene wird eine Farbe zugewiesen, um die folgenden kausalen Zusammenhänge zwischen den Ebenen zu visualisieren:

- Unterscheidungsmerkmal ↔ Funktion: Die Varianz einer Funktion ist eindeutig auf ein einzelnes Unterscheidungsmerkmal zurückzuführen
- Funktion ↔ Wirkprinzip: Das/die Wirkprinzip(ien) ist/sind zur Erfüllung der Funktion erforderlich
- Wirkprinzip ↔ Komponente: Die Komponente beinhaltet das jeweilige Wirkprinzip

Auf der zweiten Ebene des VAM wird ein Modell zur Visualisierung der Varianz auf Funktionsebene erstellt. Dieses basiert auf einer umsatzorientierten Funktionsstruktur und erlaubt die Darstellung einer Varianz in Form der drei Kategorien „unterschiedliche Funktionsausprägungen“, „variante Anzahl von Funktionen“ und „optionale Funktionen“ (Abbildung 2-14). Diese Systematik wird für die Funktionskarten im VAM übernommen (s. Abbildung 2-15 b) (Kipp, 2012, S. 84–86).



Abbildung 2-14: Systematik zur Abbildung der Varianz von Teilfunktionen (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 46))

Die Karten der varianten Wirkprinzipien und die Karten der varianten Wirkelemente bilden die dritte Ebene des VAM. Es wird dabei unterschieden, ob das gesamte Wirkprinzip variant ist oder nur Elemente des Wirkprinzips (Wirkelemente). Kommen für Funktionen alternative physikalische Effekte oder grundlegend andere Geometrien zum tragen, so ist das gesamte Wirkprinzip variant. Ist das Wirkprinzip allerdings gleich, aber die Wirkflächen, Wirkbewegungen oder Werkstoffe sind variant, so spricht man von varianten Wirkelementen. Die Karten varianter Wirkprinzipien werden am oberen Rand, die Karten varianter Wirkelemente am unteren Rand der Ebene dargestellt. Die Farbgebung sowie die Kategorisierung der Karten orientieren sich dabei an der Ebene der Funktionen (s. Abbildung 2-14 und Abbildung 2-15 c) (Kipp, 2012, S. 87–88).

Auf der untersten Ebene des VAM erfolgt eine Dekomposition der Produkte in ihre Komponenten in einem sogenannten Module Interface Graph (MIG). Das MIG ist ein Modell, das die Komponenten mit ihrem ungefähren Bauraum und ihrer Lage im Produkt sowie strukturellen Verbindungen, Stoff-, Energie- und Informationsflüssen skizziert. Durch die Wahl von Füllung und Rahmen können variante, optionale und Standardkomponenten dargestellt werden. Damit wird aus der Darstellung deutlich, in welchen Komponenten die Varianz steckt und welche Schnittstellen es zwischen den Komponenten gibt. Für alle varianten Komponenten wird eine Komponentenkarte auf der vierten Ebene des VAM erstellt, die neben der Art der Varianz (gemäß der Systematik bei Funktionen und Wirkprinzipien) auch eine Bewertung der Eigenschaften „Kosten“ und „Kopplung“ mit jeweils bis zu drei Balken enthält (Abbildung 2-15 d). Die Kostenbewertung erfolgt anhand einer ABC-Analyse, während die Eigenschaft Kopplung die Anzahl und Standardisierung der Schnittstellen bewertet. Je höher die Kopplung, desto weniger standardisiert ist eine der Schnittstellen der varianten Komponente. Kann die Vielfalt einer Komponente eindeutig einem Unterscheidungsmerkmal zugewiesen werden, so erhält die Komponentenkarte die gleiche Farbe wie die des Unterscheidungsmerkmals. Ist dies nicht der Fall, so wird die Karte rot eingefärbt (Kipp, 2012, S. 89–92).

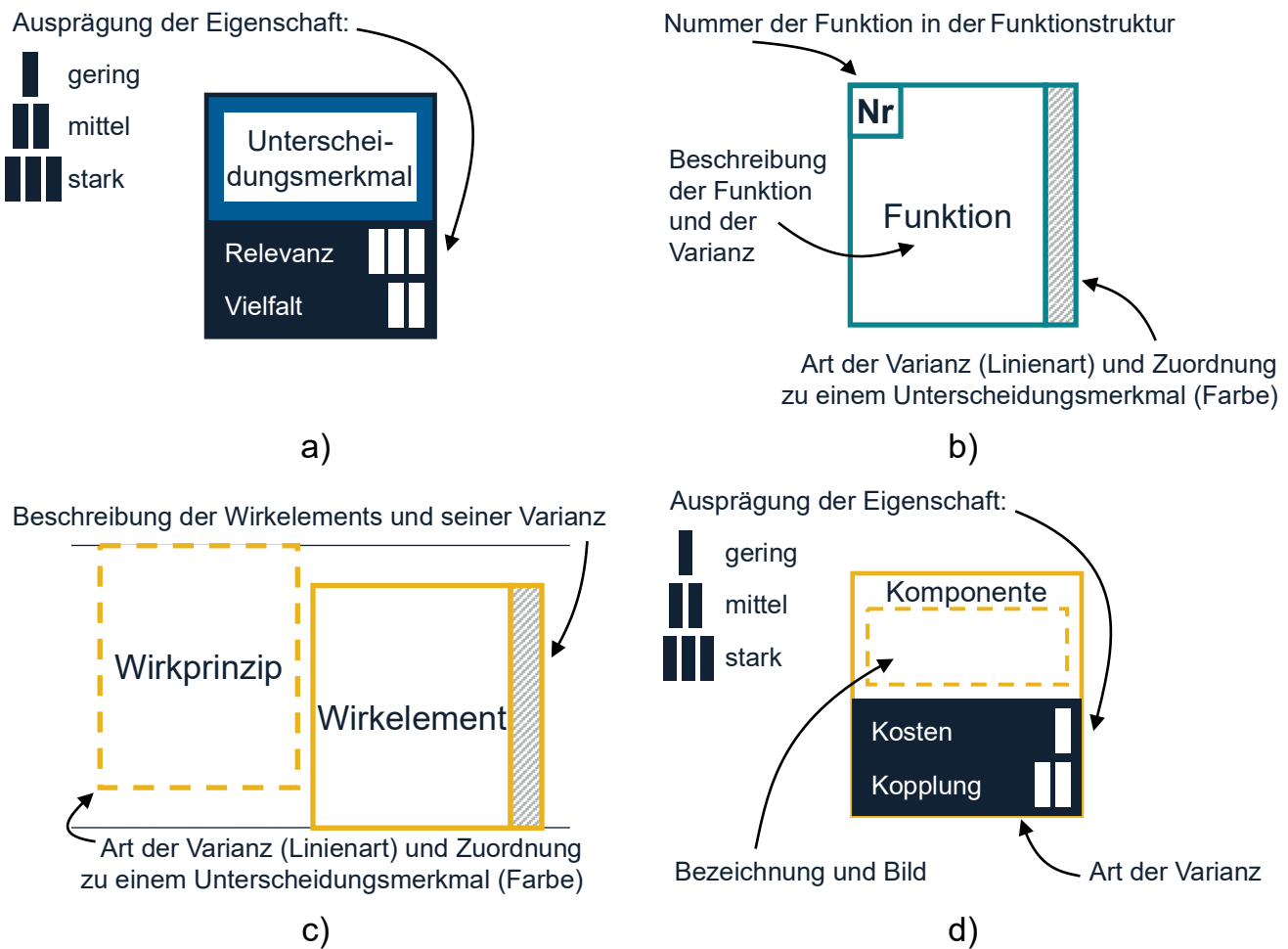


Abbildung 2-15: Darstellung der Karten auf den verschiedenen Ebenen des VAM (von oben nach unten)

Alle Ebenen zusammengefasst ergeben das VAM. Da das VAM ausschließlich die Variantsicht betrachtet, entfallen im Zuge der variantengerechten Gestaltung die standardisierten Elemente und das VAM wird so einfacher und kompakter (Kipp, 2012, S. 79–80). Dem Aufbau des VAM und damit der Analyse des Ist-Zustandes folgt die Suche nach alternativen variantengerechten Lösungsansätzen. Bezogen auf das VAM bedeutet das, dass versucht wird, sich dem in Abbildung 2-13 rechts dargestellten Idealbild anzunähern. Die Annäherung an das Idealbild erfolgt vom Konkreten zum Abstrakten und kann anhand der Änderungen im Variety Allocation Model (VAM) nachvollzogen werden. Gemeint ist damit, dass die Lösungssuche und Änderungen am Produkt zunächst auf der Komponentenebene mit Anpassungskonstruktionen beginnen. Ist dies nicht ausreichend, kann die Lösungssuche auf den Ebenen der Wirkprinzipien und der Funktionen fortgesetzt werden, was zumeist größere Verbesserungspotenziale ermöglicht, aber auch mit einem größeren Entwicklungsaufwand verbunden ist. Für jede Ebene existieren Ziele, die für eine variantengerechtere Gestaltung der Produktfamilie

sorgen. Werden die bestehenden Ausprägungen der Unterscheidungsmerkmale den Kundenbedürfnissen nicht mehr gerecht, oder eignen sich die Ausprägungen bestehender Produkte nicht als Basis einer konfigurierbaren Produktfamilie, so können neue Ausprägungen auf der Ebene der Unterscheidungsmerkmale ermittelt werden. Dies kann basierend auf geometrischen Normzahlreihen, den Marktbedürfnissen oder durch numerische Optimierung erfolgen (Kipp, 2012, S. 95–121).

Die Lösungsalternativen können am Ende von Phase zwei der variantengerechten Produktgestaltung objektiv und subjektiv bewertet werden. Für die objektive Bewertung existieren Eigenschaftsgrößen, die die zuvor genannten vier Kriterien Differenzierung, Reduzierung, Eins-zu-eins-Zuordnung und Entkopplung bewerten und so einen Vergleich der Lösungsalternativen untereinander, oder zwischen dem ermittelten Zustand und dem Ausgangszustand, ermöglichen. Über das VAM können die Anzahl varianter Komponenten mit hohen anteiligen Kosten ($N_{Var A}$), die Anzahl varianter Komponenten mit mittleren anteiligen Kosten ($N_{Var B}$) und die Anzahl aller varianten Komponenten ($N_{Var Ges}$) ermittelt werden. Je niedriger diese Zahlen, desto variantengerechter ist die Lösung in Bezug auf die Kriterien Reduzierung und Differenzierung. Die durchschnittliche Anzahl der zusätzlichen Komponenten, die aufgrund eines Unterscheidungsmerkmals variant sind (K_{Unt}) und die durchschnittliche Anzahl der zusätzlichen Unterscheidungsmerkmale, die die Vielfalt einer Komponente verursachen (K_{Komp}), bewerten die Erreichung einer Eins-zu-eins-Zuordnung und sollten möglichst klein sein (Kipp, 2012, S. 123–127).

$$K_{Unt} = \frac{\text{Anzahl der Zuordnungen}}{\text{Anzahl der Unterscheidungsmerkmale}} - 1 = \frac{N_{Zuordnungen}}{N_{Unt}} - 1 \quad 2-8$$

$$K_{Komp} = \frac{\text{Anzahl der Zuordnungen}}{\text{Anzahl der varianten Komponenten}} = \frac{N_{Zuordnungen}}{N_{VarGes}} - 1 \quad 2-9$$

Aus der Komponentenebene des VAM kann die Anzahl der varianten Komponenten mit starken Kopplungen ($N_{Kop A}$) und die Anzahl der varianten Komponenten mit mittleren Kopplungen ($N_{Kop B}$) ermittelt werden. Kleinere Werte bedeuten jeweils eine bessere Entkopplung. Während mit dem Objektivschritt der Bewertung die Grundlagen für eine Entscheidung über die Weiterverfolgung von Lösungsalternativen geschaffen wird, erfolgt mit dem Subjektivschritt eine vergleichende Bewertung durch z.B. eine gewichtete

Punktbewertungen, ein Vergleich oder eine Nutzwertanalysen, um eine Entscheidung zu treffen. (Kipp, 2012, S. 123–127).

2.4.2.2 Modularisierung mit organisatorischem und prozessorientiertem Fokus

Über alle Produktlebensphasen hinweg tangieren die Komponenten eines Produktes verschiedene Organisationseinheiten und Prozesse. Die Modularisierung von Produkten unter Berücksichtigung dieser Interaktionen kann sowohl die Entwicklung als auch die Nutzung und Wartung dieser Produkte vereinfachen, indem z.B. die Entwicklung einzelner Module als abgeschlossene Aufgabe einer Organisationseinheit zugeordnet werden kann (Krause & Gebhardt, 2018, S. 190).

2.4.2.3 Modularisierung mit produktstrategischem Fokus

Die Berücksichtigung produktstrategischer Aspekte, d.h. unternehmensspezifischer Aspekte in den verschiedenen Produktlebensphasen, bei der Modularisierung soll dabei helfen, eine geplante Unternehmensstrategie zu erreichen. Wird beispielsweise eine Technologieführerschaft angestrebt, so könnten Produktkomponenten, die kurze Innovationszyklen aufweisen, in Modulen zusammengefasst werden. Darüber hinaus werden Strategien meist von vielen Faktoren und Interessen beeinflusst. Ziel der Methoden in diesem Bereich ist die Bereitstellung von Werkzeugen zur Zusammenführung dieser unterschiedlichen Interessen und zur Berücksichtigung strategischer Aspekte (Krause & Gebhardt, 2018, S. 192–193).

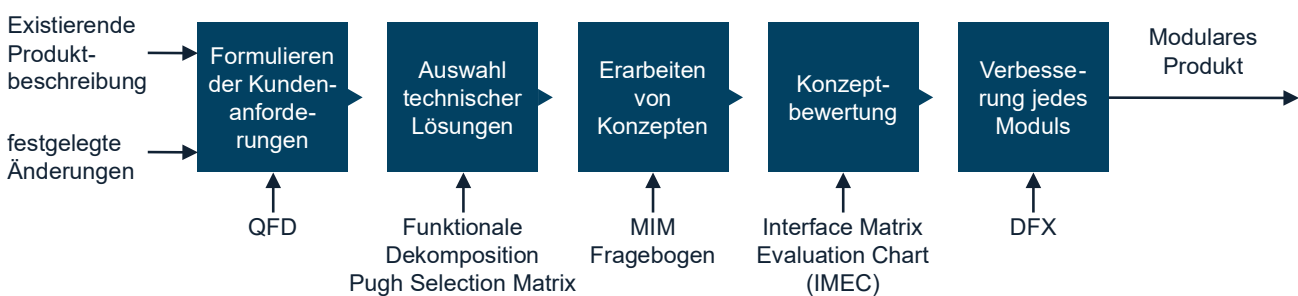


Abbildung 2-16: Vorgehensweise der Modular Function Deployment nach (Erixon, 1998, S. 65)

Der mit bekannteste Ansatz dieser Art der Modularisierung ist das Modular Function Deployment (MFD). In einem fünfschrittigen Vorgehen werden Kundenanforderungen - unter Berücksichtigung strategischer Absichten - in eine modulare Produktarchitektur überführt. Unter der Prämisse, dass Produkte und Dienstleistungen nur dann erfolgreich sein können, wenn sie kompromisslos am Nutzen der Kunden orientiert sind und

einen höheren Nutzen relativ zum Wettbewerb bieten, werden zu Beginn der Methode die Kundenanforderungen über ein Quality Function Deployment (QFD) mit den Produktmerkmalen in Beziehung gesetzt. In einem **House of Quality (HoQ)** werden die Ergebnisse visualisiert. Dazu werden die (Kunden-) Anforderungen mit einer Gewichtung in die Zeilen einer zweidimensionalen Beziehungsmatrix eingetragen (Krause & Gebhardt, 2018, S. 193).

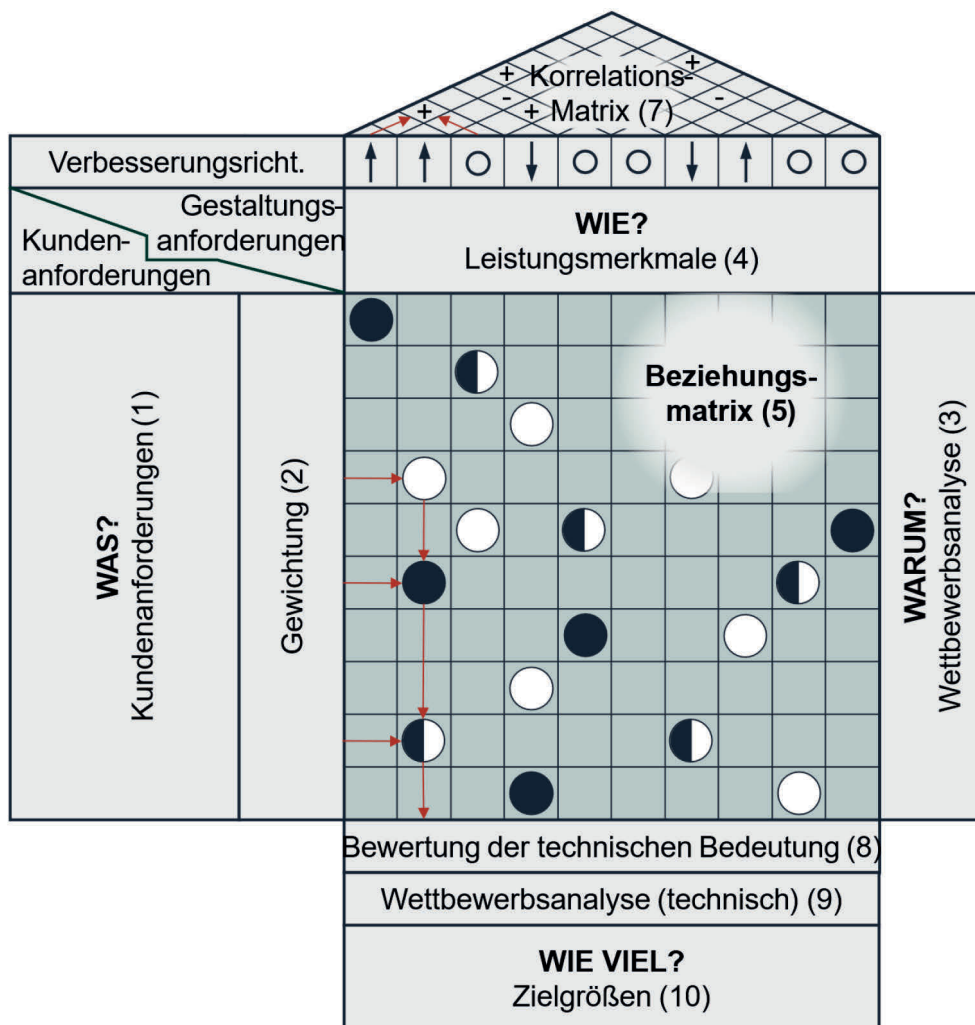


Abbildung 2-17: House of Quality (eigene Darstellung in Anlehnung an (Hering & Schloske, 2022))

Bevor in die Spalten die für das betrachtete Produkt relevanten Funktionen zur Erfüllung der Kundenanforderungen gelistet werden, kann in einer weiteren Matrix eine quantitative Bewertung der Kundenanforderungen aus Marktsicht erfolgen. Hier wird die Erfüllung der Kundenanforderungen durch vergleichbare Produkte des Wettbewerbs oder auch die strategische Wichtigkeit der Kundenanforderung bewertet. Aus der qualitativen Bewertung der Anforderungen durch die Gewichtung im Zusammenspiel mit der

quantitativen Bewertung in der Planungsmatrix kann dann die Rangfolge der strategischen Bedeutung der Kundenbedürfnisse ermittelt werden. Für die Funktionen in den Spalten der Beziehungsmatrix werden dann Optimierungsrichtungen angegeben und anschließend die Zusammenhänge zwischen den Anforderungen und den Funktionen über die Korrelationskennziffern 1 (schwacher Zusammenhang), 3 (mittlerer Zusammenhang) und 9 (starker Zusammenhang) innerhalb der Beziehungsmatrix angegeben. Das Dach des HoQ dokumentiert Korrelationen zwischen den Funktionen, um Konflikte aufzudecken. Unterhalb der Beziehungsmatrix wird dann die Schwierigkeit zur Realisierung der Funktionen bewertet und jeder Funktion ein quantifizierbarer Zielwert zugeordnet. Nachfolgend kann optional ein weiterer Wettbewerbsvergleich, diesmal aber aus technischer Sicht, erfolgen (Krause & Gebhardt, 2018, S. 194–196). Über die Multiplikation der anfänglichen Gewichtung der Kundenanforderungen mit dem jeweiligen Zellenwert der Beziehungsmatrix und die spaltenweise Addition dieser Werte ergibt sich im letzten Schritt eine Kennzahl, welche die technische Bedeutung der einzelnen Funktionen darstellt (Hering & Schloske, 2022, S. 1–8). Ein robustes modulares Produktdesign zeichnet sich durch minimale Wechselwirkungen zwischen den Modulen aus (Erixon, 1998, S. 69). Deswegen werden in Schritt zwei des MFD die Funktionen in Beziehung zu technischen Lösungen in einer Design Matrix nach Suh (1989) oder einem Function Means Tree nach Andreasen (1980) gesetzt. So können den einzelnen Funktionen unabhängige technische Lösungen zugeordnet werden. Werden mehrere Lösungen einer Funktion zugeordnet, so kann über eine Auswahlmatrix nach Pugh (1981) die am besten geeignete Alternative ausgewählt werden.

In einer Module Indication Matrix (MIM) werden im dritten Schritt die technischen Lösungen zu Modulen unter der Berücksichtigung produktstrategischer Gesichtspunkte zusammengefasst. Erixon stellt dafür 12 sogenannte Modultreiber vor, die aus Fallstudien ermittelt wurden, und bei denen es sich um produktstrategische Gründe für die Bildung von Modulen handelt. In der Praxis sollten diese aber um weitere, anwenderspezifische Modultreiber ergänzt werden. Den gewichteten Modultreibern in den Zeilen der MIM werden technische Lösungen in den Spalten gegenübergestellt, und die Bedeutung der Treiber für die jeweilige Lösung wird in der entsprechenden Zelle der Matrix auf einer Punkteskala mit 1 (schwacher Treiber), 3 (mittlerer Treiber) oder 9 (starker Treiber) bewertet. Über das Aufsummieren der Bewertungen in einer Spalte ergeben sich die Gesamtbewertungen der einzelnen Lösungen. Die Komponenten mit einer hohen Bewertung können eigene Module oder die Grundlage für Module bilden,

Komponenten mit ähnlichen Bewertungen können zu einem Modul zusammengefasst und Komponenten mit niedrigen Bewertungen können einfacher in andere Module integriert werden. Dadurch ergeben sich, je nach Festlegung der Module, verschiedene Konzepte, die im vierten Schritt des Vorgehens bewertet werden. Auf Basis der Bewertung wird eines der Konzepte zur Weiterverfolgung ausgewählt. Im letzten Schritt werden die Module gestaltet, wobei hier lediglich auf gängige Entwicklungsmethoden verwiesen wird (Krause & Gebhardt, 2018, S. 193–196).

Die MFD stellt somit einen nachvollziehbaren Ansatz dar, der ohne den Einsatz von Algorithmen eine Unterteilung von Produkten in Module erlaubt. Zudem wird der Anwender auch bei der Festlegung der richtigen Anzahl an Modulen unterstützt. Jedoch müssen die generischen 12 Modultreiber um anwenderspezifische ergänzt werden. Dies und auch die Erstellung der Modulkonzepte setzt Expertise voraus.

Seit der Entwicklung der MFD ist die Zahl der Anwendungsbereiche und Erweiterungen der Methode stetig gestiegen, um z.B. MIM und QFD zu verbinden (Nilsson & Erixon, 1998), Modultreiber zur kategorisieren (Stake, 2000), oder auch um die technisch-funktionale Sicht mittels der DSM nach Pimmler und Eppinger (1994) mit den produktstrategischen Aspekten nach Erixon (1998) zu verbinden (Blackenfelt, 2001; Börjesson, 2009, 2012; Francalanza, Mercieca & Fenech, 2018; Koeppen, 2008; Kohl, Roth & Lindemann, 2016; Koppenhagen, 2004; Lange & Imsdahl, 2014; Lanner & Malmqvist, 1996; Newcomb, Bras & Rosen, 1998).

Die Reduzierung der notwendigen Abstimmungsaufwände in der Konkretisierung von Produkten kann mit einer gezielten Produktstrukturierung erfolgen. Diese fokussiert die Gestaltung der Produktstruktur auf die Erstellung einer hohen Angebotsvielfalt am Markt mithilfe einer reduzierten internen Vielfalt an Komponenten. Sowohl technische, organisatorische sowie produktstrategische Aspekte werden in der Produktstrukturierung für mechatronische Systeme nach Steffen (2007) berücksichtigt. Das Verfahren ermöglicht eine Strukturierung mechatronischer Systeme in der frühen Phase der Produktentwicklung und bietet mit den Entwurfsregeln eine Unterstützung in der Anwendung. Durch die Zuordnung von Entwurfsregeln zu mehreren Methoden ist eine klare Abgrenzung, wann welche Methode eingesetzt werden sollte, nicht möglich.

2.4.2.4 Methodenbaukästen

Im Fokus der oben beschriebenen Vorgehensweisen zur Modularisierung von Produkten steht die Überführung von Anforderungen in Module. Da aber in der Praxis

modulare Produkte meist als Teil von Produktsystemen, wie Baukästen, entwickelt werden und in der Regel mehrere Unternehmensbereiche sowie Zulieferer an der Wertschöpfung der modularen Produkte beteiligt sind, ist der Erfolg modularer Produkte als Teil von Produktsystemen von deutlich mehr Faktoren abhängig. Die Abbildung dieser zusätzlichen Komplexität ist mit den oben beschriebenen Ansätzen nur eingeschränkt möglich. Darüber hinaus bieten sie wenig Unterstützung beim Vorgehen zur Erhebung der für die Bewertung notwendigen Daten und bei der Abschätzung der Auswirkungen von Produktveränderungen auf die Produktionsprozesse. Aus diesem Grund wurden Vorgehensmodelle entwickelt, die Unternehmen schrittweise bei der Entwicklung modularer Produkte unterstützen und dazu in den verschiedenen Phasen mehrere Methoden zur Verfügung stellen (Schuh, 2015, S. 4–5).

Im Folgenden wird der **integrierte PKT-Ansatz** als Beispiel für einen solchen Methodenbaukasten beschrieben. Das Ziel, die vom Markt geforderte, externe Angebotsvielfalt zu erhalten, dabei aber die interne Produktvielfalt und Prozesskomplexität möglichst gering zu halten, wird seit 2006 mit dem „Integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien“ (kurz Integrierter PKT-Ansatz) am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) verfolgt (Krause, Hartwich & Rennpferdt, 2020, S. 65). Der aus einzelnen, ineinandergreifenden Methodenbausteinen bestehende Methodenbaukasten umfasst die Ebenen Produkt und Prozess. Kern dieses Methodenbaukastens auf der Produktebene bilden die vier Methodenbausteine Produktprogrammplanung nach (Jonas, 2014), Entwicklung von Produktprogrammen mit hoher Kommunalität nach (Eilmus, 2016), die variantengerechte Produktgestaltung nach Kipp (2012) sowie die Lebensphasen-Modularisierung nach Blees (2011). Diese greifen auf die etablierten und teilweise oben beschriebenen Ansätze wie z.B. der „Theory of Modular Design“ nach Stone (1997) und der MFD nach Erixon (1998) zurück und erweitern diese.

Der erste Methodenbaustein bietet eine Möglichkeit zur strategischen Planung modularer Produktprogramme, die darauf abzielt, die externe Produktvielfalt marktgerecht auszurichten und die interne Komplexität zu reduzieren (Jonas, 2014). Darauf aufbauend unterstützt der Methodenbaustein zur Entwicklung von Produktprogrammen mit hoher Kommunalität die Produktprogrammgestaltung zur Reduzierung von Komplexität und Kosten (Eilmus, 2016). Die Lebensphasenmodularisierung nach Blees (2011) verfolgt das Ziel, eine modulare Produktarchitektur als Kompromiss aus den Anforderungen der Produktlebensphasen zu erstellen.

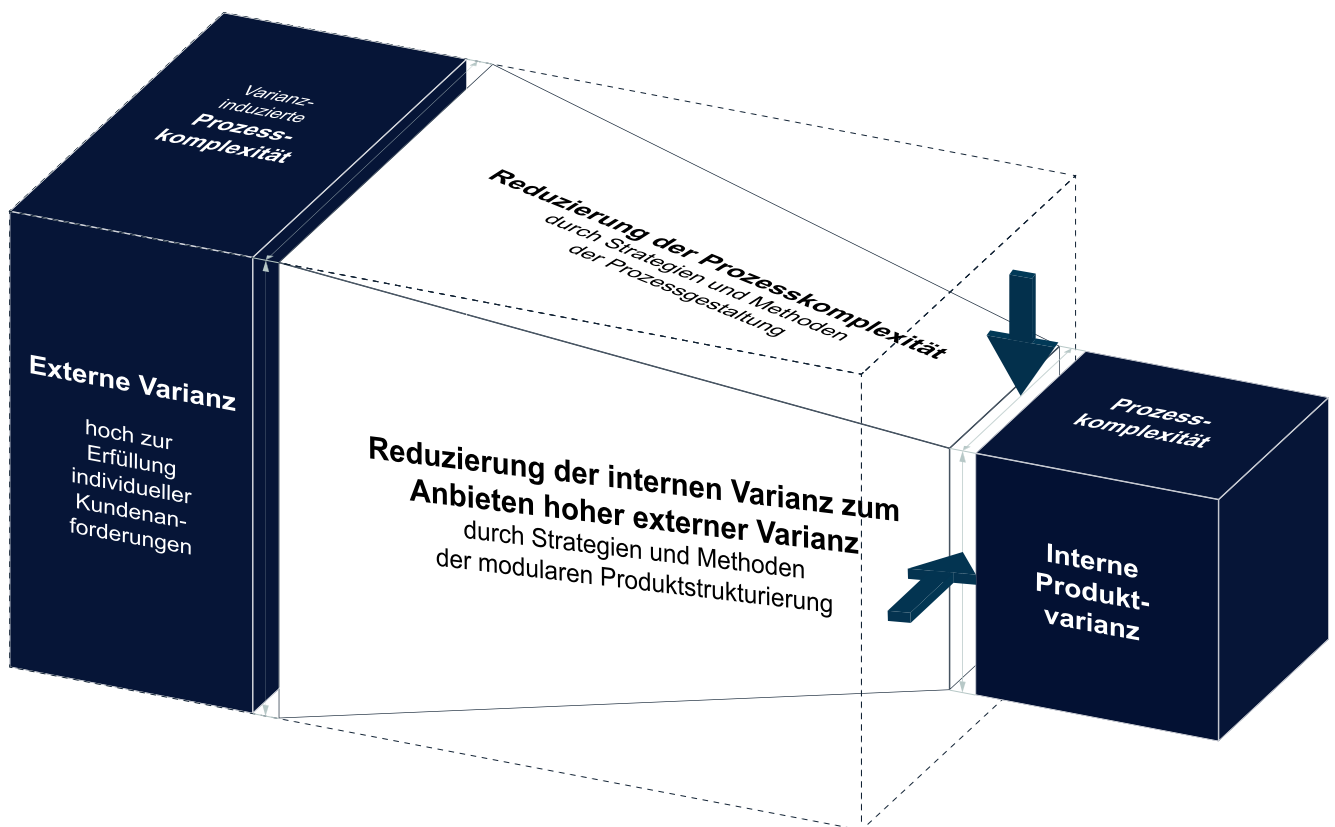


Abbildung 2-18: Zielsetzung des Integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien (eigene Darstellung in Anlehnung an (Krause & Gebhardt, 2018, S. 216))

Die Vorgehensweise besteht, wie in Abbildung 2-19 dargestellt, aus drei Phasen, die sich wiederum aus insgesamt acht Schritten zusammensetzen. Phase eins dient der Klärung der Aufgabenstellung, Phase zwei der Variantengerechten Produktgestaltung und Phase drei der Modularisierung (Blees, 2011, S. 67). Der Zieldefinition in Phase eins folgt die Ist-Aufnahme, in der zunächst über einen Merkmalsbaum die varianten Produktmerkmale erfasst werden. Parallel dazu wird eine umsatzorientierte Funktionsstruktur erstellt, die sich auf die Analyse der Stoff-, Energie- und Signalumsätze im Produkt fokussiert und darüber hinaus drei Arten der Varianz unterscheidet. Die Ergebnisse der Ist-Aufnahme lassen sich in einem MIG visualisieren (Blees, 2011, S. 67–68). Darin werden die Komponenten als graue Rechtecke in ihrer ungefähren Größe, Lage und Form im realen Produkt eingezeichnet und durch Flüsse miteinander verbunden. Dadurch können, im Unterschied zur matrixförmigen Darstellung in anderen Methoden, Randbedingungen bezüglich der Lage von Komponenten in Produkten berücksichtigt werden (Blees, 2011, S. 71–78). In Phase zwei erfolgt die in Kapitel 2.4.2.1 beschriebene variantengerechte Gestaltung der Komponenten nach Kipp (2012).

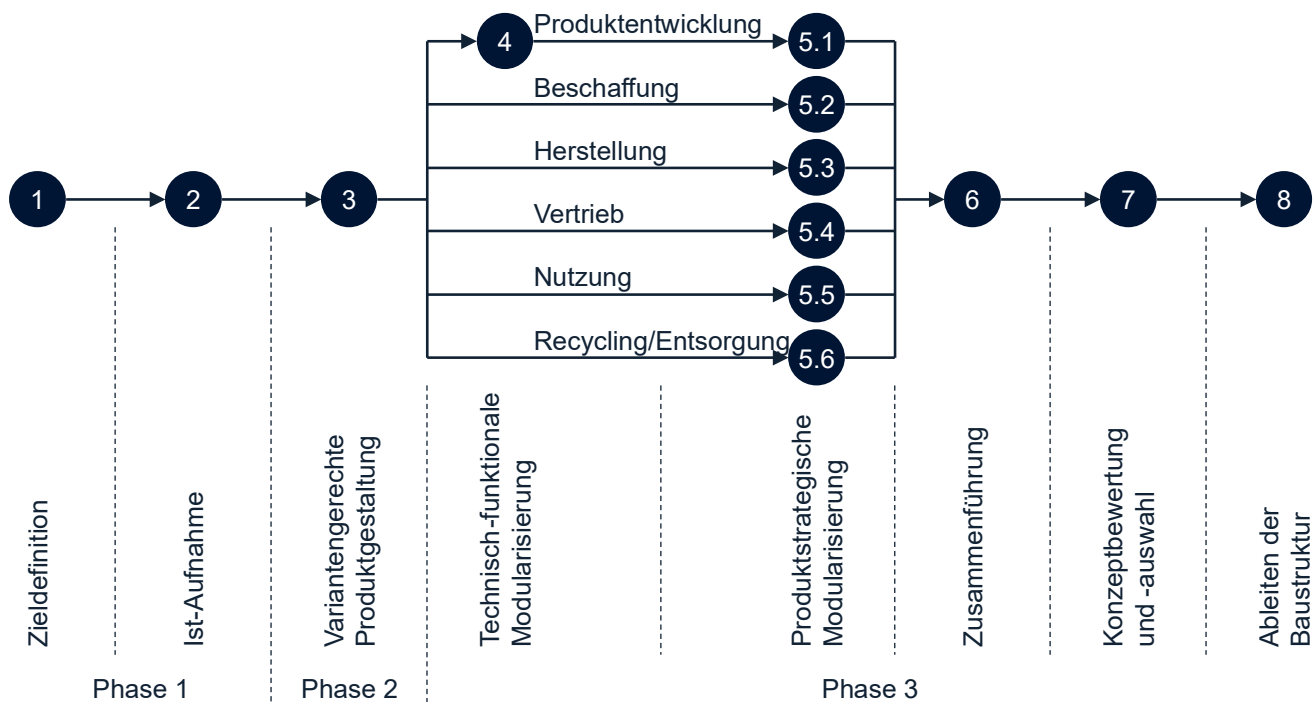


Abbildung 2-19: Arbeitsschritte der Lebensphasenmodularisierung (eigene Darstellung in Anlehnung an (Blees, 2011, S. 67))

Die Modularisierung erfolgt in Phase drei der Lebensphasenmodularisierung und setzt sich aus Lösungen unterschiedlicher Perspektiven zusammen. Die technisch-funktionalen Perspektive wird mit den Heuristiken der Modular Design Methodology nach Stone (1997) umgesetzt. Nach Einzeichnung der Flüsse in den MIG, der Hierarchisierung der Flüsse und Anwendung der Heuristiken, werden abschließend die Module mit räumlich-geometrischen Anforderungen abgeglichen. Die produktstrategische Modularisierung wird mit einer Weiterentwicklung des Modultreiberkonzepts nach Erixon (1998) realisiert. Die Weiterentwicklung sieht ein drei-Ebenen-Konzept vor, bei dem auf der obersten Ebene die Produktlebensphasen stehen, denen auf der mittleren Ebene die Modultreiber zugeordnet werden. Je nach Anwendungsfall können dann auf der untersten Ebene die Modultreiberausprägungen definiert werden. Die Modulbildung anhand der Treiber erfolgt mit einem Netzplan, der auf dem Vorgehen nach Göpfert (1998) basiert. Auf der linken Seite der rautenförmigen Darstellung stehen die Modultreiber, die über ihre Ausprägungen Komponenten zugeordnet werden können. Über unterschiedliche Verbindungslinien kann die Stärke der Beziehung zwischen Modultreiberausprägungen und Komponenten visualisiert werden. Die Komponenten, die eine Beziehung zu einer gemeinsamen Modultreiberausprägung haben, werden zu Modulen zusammengefasst. Die Module sollten dabei weder weitere Komponenten umfassen, noch sollten die Komponenten Beziehungen zu mehreren Modultreiberausprägungen

haben. Überschneiden sich Module, so erfolgt die Zuordnung nach der Bedeutung der Ausprägungen oder der Stärke der Beziehungen (Blees, 2011, S. 68–71).

Unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Modultreiber können für jede Produktlebensphase Produktstrukturen ermittelt werden, die den Anforderungen der jeweiligen Phase gerecht werden. Die Zusammenführung der einzelnen Produktstrukturen erfolgt mit Unterstützung des sogenannten Module Process Chart (MPC), das die Module in den einzelnen Produktlebensphasen zeigt. Ziel des Arbeitsschrittes in diesem Teil der Lebensphasenmodularisierung ist die Erstellung eines durchgehenden Prozesses durch alle Lebensphasen. Dazu müssen bisher unberücksichtigte Komponenten Modulen zugeordnet werden und Widersprüche zwischen den Produktlebensphasen aufgelöst werden. Infolge der Bildung von Produktkonzepten aus dem optimierten MPC können über technisch-funktionale und produktstrategische Kennzahlen Vergleiche zwischen den Konzepten angestellt werden. Die Module Coupling Independence (MCI) misst die technisch-funktionale Entkopplung zwischen den Modulen (Blees, 2011, S. 100–121).

$$MCI = \frac{\text{Anzahl der Schnittstellen innerhalb der Module}}{\text{Gesamtanzahl der Schnittstellen}} \quad 2-10$$

Produktstrategische Aspekte werden mit der Überprüfung der Eindeutigkeit der Abbildung der Modultreiberausprägungen in der Produktstruktur untersucht. Die Kennzahl der Module Driver Independence (MDI) gibt die Wertigkeit der Module aller Modultreiber an und bewertet, wie eindeutig die Abbildung der Modultreiberausprägungen in der Produktstruktur erfolgt (Blees, 2011, S. 82–90). Die Wertigkeit ermittelter Konzepte wird mit einer gewichteten Zusammenführung von MCI und MDI realisiert, wobei der Gesamtwert lediglich als Anhaltspunkt für die Konzeptbewertung dient (Blees, 2011, S. 112).

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass Methodenbaukästen wie der Integrierte PKT-Ansatz eine durchgehende Vorgehensweise für Unternehmen bieten und in diesem Zuge eine große Methodensammlung zur Verfügung stellen. Durch eine ganzheitliche Betrachtung der Entwicklung modularer Produkte wird dem Anwender ein Weg aufgezeigt, an dem er sich entlanghangeln kann. Die einzelnen Phasen sind dabei meist voneinander getrennt und ermöglichen so auch die individuelle Anwendung einzelner Methoden.

2.5 Folgerungen aus dem Stand der Technik

In Kapitel 2 werden zunächst Greifer in den Kontext von Handhabungsoperationen eingeordnet. Während pneumatische Greifer lediglich zwei Zustände kennen und damit wenig flexibel sind, sie wenig Kontrolle bei Greifkräften bieten und darüber hinaus in einigen Umfeldern aufgrund des Risikos einer Luftverschmutzung nicht eingesetzt werden können, ist auch der Einsatzbereich hydraulischer Greifer aufgrund einer möglichen Leckage begrenzt. Elektrische Greifer hingegen sind vollständig programmierbar und ermöglichen zudem eine feinere Kontrolle über Geschwindigkeit und Greifkraft. Darüber hinaus liefern elektrische Greifer Statusinformationen, wie die Position der Grundbacken, die Geschwindigkeit oder die Werkstückerkennung. Damit ermöglicht ein elektrischer Greifer die Handhabung einer Vielzahl auch unterschiedlicher Handhabungsobjekte.

Die Wirkelemente von Greifern, als einzige Komponenten des gesamten Handhabungssystems mit direktem Kontakt zum Werkstück, tragen wesentlich zum Erfolg einer Handhabungsoperation bei. Die Gestaltung dieser Wirkelemente erfolgt noch meist manuell. Dies erfordert zeitaufwändiges Entwerfen, Herstellen und Testen der notwendigen Anpassungen. Montage- und Produktionslinien werden daher in der Regel für wenige Produkttypen eingerichtet, die dann über einen längeren Zeitraum in Massen produziert werden. Der Trend zu flexibel automatisierten Lösungen für die Herstellung kleinerer Stückzahlen verstärkt die Forderung nach einer Reduzierung des Aufwands zur Anpassung von Greifern an neue Produkte, was durch eine automatisierte Gestaltung der Greiferfinger erreicht werden kann. Ansätze zur automatisierten Gestaltung der Wirkelemente zielen auf den Entwurf meist individueller Greiferfinger zur Handhabung eines oder weniger Werkstücke in genauer Orientierung und Position ab. Änderungen am Bauteil oder in der Handhabung erfordern daher neue Greiferfinger. Neben der geringen Flexibilität erfüllen diese Ansätze auch nicht die Anforderungen der Funktionsintegration als wichtige Voraussetzung in der Robotik im Kontext der Entwicklung langfristig autonomer Systeme. Mit der großen Anzahl beweglicher Teile in Kombination mit langsamen Geschwindigkeiten, begrenzter Greifkraft und komplexer Ansteuerung erfüllen flexible Greifer(-finger) in vielen Punkten nicht die Anforderungen einer wirtschaftlichen Produktion (Birglen, Laliberté & Gosselin, 2008, S. 13; Monkman, 2007, S. 59f.). Modulare Greiferfinger, bestehend aus zuvor definierten, wiederverwendbaren Elementen, können dagegen die Anpassungszeit bei Änderungen der Handhabungsaufgabe

deutlich verkürzen. Dies wird erreicht, indem z.B. nur die Fingerwirkflächen automatisiert angepasst und hergestellt, dann aber mit Standard-Fingerkomponenten zur neuen Fingergeometrie kombiniert werden. (Ringwald et al., 2023, S. 2).

Obwohl bereits marktreife Lösungen existieren, ist das Vorgehen der Modulbildung bei Greiferfingern bisher nicht beschrieben und die Ansätze zur Modularisierung sind sehr unterschiedlich. Die beschriebenen Methoden zur Modularisierung wurden bisher nicht in der Anwendung auf Greiferfinger untersucht. Die Auswahl von Konfigurationen und die Einhaltung von Randbedingungen, vorgegeben beispielsweise durch den Greiferhersteller, obliegt dem Anwender bei der Gestaltung der Greiferfinger. Es bedarf daher einer systematischen Vorgehensweise, die auf Basis definierter Handhabungsobjekte die minimal notwendige Anzahl unterschiedlicher Konfigurationen und die dafür zu verwendenden Module ermittelt.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der heute meist manuelle Prozess der Gestaltung von Greiferfingern soll in dieser Arbeit durch eine durchgängige Methode zur automatisierten Greiferfingergestaltung ersetzt werden. Der neue Ansatz soll bestehende Defizite im Stand der Forschung und Technik beseitigen, indem der Prozess der Fingergestaltung vereinfacht, die Fingergestalt modularisiert und damit durch den Austausch einzelner Komponenten schnell angepasst werden kann, ergänzt durch eine nachvollziehbare Bewertung, die für den konkreten Anwendungsfall die jeweils optimale Fingergestalt ermittelt. **Zielsetzung** der Arbeit ist die Entwicklung dieser durchgängigen Methode, die den Anwender – ausgehend von einem festgelegten Umfang an Greifertypen – von der Definition eines möglichst optimalen Baukastens, über die Ermittlung und Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen, bis hin zur Ermittlung der notwendigen Anzahl verschiedener Greiferfingerkonfigurationen unterstützt.

Dieses Ziel kann auf zwei Wegen erreicht werden: Der erste Ansatz baut auf bestehenden Lösungen auf, wie der automatisierten Konfiguration von Greiferfingern aus einem Baukasten (z.B. Weiss Robotics FINGERKIT) oder der Übertragung eines Ansatzes zur automatisierten Gestaltung von Greiferfingern auf einen modularen Greiferfingerbaukasten. Der zweite Ansatz entwickelt eine grundlegend neue Methode unter Einbeziehung etablierter Verfahren der Produktentwicklung. Um die Einschränkungen bestehender Ansätze zu überwinden und deren Defizite zu beheben, wird der zweite Weg verfolgt.

Die **Vorgehensweise** zur Zielerreichung basiert auf dem Design Science Research Vorgehensmodell nach (Peppers et al., 2007). Obwohl ursprünglich für die Anwendung im Bereich der Wirtschaftsinformatik entwickelt, kann die zugrundeliegende Methode, nach Auffassung der Forschungsliteratur, auch in einem breiteren Kontext angewendet werden (Niehaves, 2007, S. 6). Das Entwickeln von sogenannten Artefakten steht im Fokus des Design Science Research. Ein Artefakt kann als eine vom Menschen geschaffene Lösung für ein praktisches Problem verstanden werden, die den vier Kategorien Konstrukt, Modell, Methode und Instanziierung zugeordnet werden kann (Hervner et al., 2004, S. 77). Artefakte in Form von Konstrukten definieren die zentralen Begriffe und Prinzipien, um ein Problem- und Lösungskonzept in einem bestimmten Kontext zu definieren. Modellartefakte bieten abstrakte Darstellungen und Erklärungen, um das Verständnis für bestimmte Aspekte eines Problems oder einer Lösung zu

verbessern, oder komplexe Beziehungen zu beschreiben. Methodenartefakte sind systematische Vorgehensweisen zur Problemlösung, um bestimmte Aufgaben oder Prozesse zu gestalten und zu steuern, wobei der Fokus auf der praktischen Anwendung liegt. Artefakte der Instanziierung sind Operationalisierungen von Konstrukten, Modellen und Methoden und damit realisierte, funktionale Versionen einer Problemlösung, die getestet oder evaluiert werden können (Hevner et al., 2004, S. 78–79; Hunziker & Blankenagel, 2024, S. 115–116). Bezogen auf den Inhalt dieser Arbeit kann die genannte Zielstellung durch die Schaffung eines Artefakts in Form einer Methode erreicht werden.

Das Vorgehen und die Zuordnung der einzelnen Kapitel dieser Arbeit zu den Phasen des Vorgehensmodells nach (Peppers et al., 2007) ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

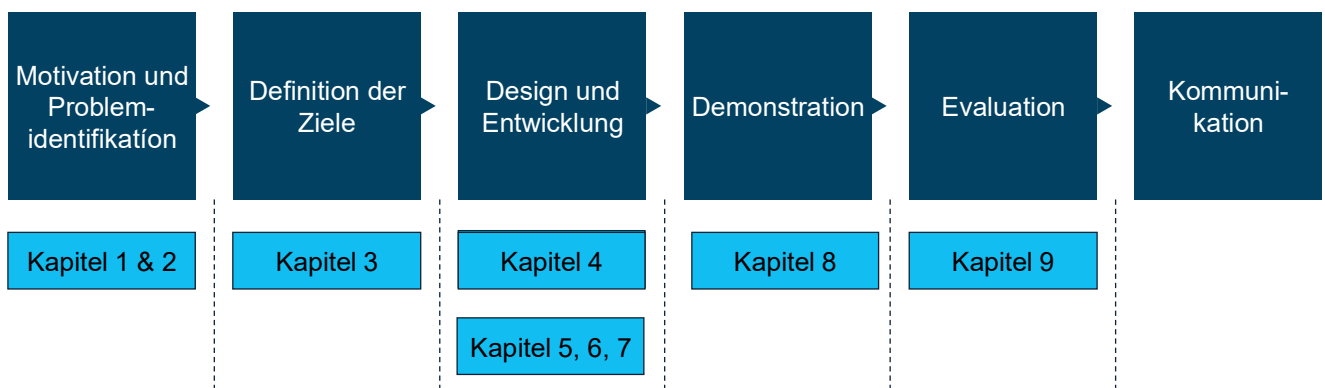


Abbildung 3-1: Der Aufbau und die Vorgehensweise ist an das Vorgehensmodell des Design Science Research angelehnt (eigene und veränderte Darstellung nach (Peppers et al., 2007, S. 54))

Aufbauend auf der Motivation in Kapitel 1 und der Problemidentifikation in Kapitel 2 folgte die Beschreibung der Zielsetzung in diesem Kapitel. Daran anknüpfend werden im Kapitel 4 die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode spezifiziert, und es erfolgt die Entwicklung der Methode in Kapitel 4 mit einer detaillierteren Beschreibung in den Kapiteln 5-7. Anhand eines Beispiels wird in Kapitel 8 gezeigt, wie die Methode angewendet wird. Abschließend folgt eine Zusammenfassung und kritische Bewertung der Ergebnisse in Kapitel 9. Die Veröffentlichung dieser Arbeit entspricht dem Schritt der Kommunikation.

4 Methode zur automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger

4.1 Anforderungen an die Methode

4.1.1 Methodische Anforderungen an die Entwicklung

Um die bisherige und noch weit verbreitete Vorgehensweise der manuellen und iterativen Greiferfingergestaltung abzulösen, muss mit der Methode ein möglichst **vollständiger Lösungsraum** aufgespannt werden, aus dem dann eine für eine Handhabungsaufgabe optimale Lösung ausgewählt wird. Aufgrund der hohen Anzahl an unterschiedlichen Handhabungsaufgaben sowie Kombinationsmöglichkeiten von Fingerelementen kann der Aufbau des Lösungsraumes nur automatisiert erfolgen.

Das oben genannte Ziel einer durchgängigen Methode, d.h. einer Methode, die neben der eigentlichen Konfiguration auch die Definition der Module und die Greifpositionsbestimmung an den Handhabungsobjekten abdeckt, kann nur erreicht werden, wenn die Schnittstellen zwischen den Methodenbausteinen definiert sind. Die Methode muss dabei **in sich konsistent und eindeutig** sein.

Während der Konfiguration von Greiferfingern wird eine große Anzahl möglicher Lösungen ermittelt und der Lösungsraum aufgespannt. Mit einer Bewertung hingegen erfolgt eine Reduzierung des Lösungsraumes auf eine oder wenige Alternativen. Entscheidungen über die ausgewählte(n) Alternative(n), die dem Anwender präsentiert werden, müssen **systematisch und nachvollziehbar** getroffen werden.

4.1.2 Technische Anforderungen

Die Methode soll zur **Verwendung im industriellen Umfeld** geeignet sein. Es sind daher die hierfür geltenden Anforderungen zu berücksichtigen. Bestehende Praktiken wie die intuitive oder erfahrungsbasierte Modularisierung sind aufgrund fehlender Nachvollziehbarkeit oder Bewertbarkeit nicht geeignet. Die Ergebnisse müssen darüber hinaus mit den wichtigsten industriell relevanten Greiferarten nutzbar sein. Diese sind nach wie vor Zweifingerparallelgreifer. Aufgrund ihrer Flexibilität zum präzisen und dynamischen Anfahren beliebiger Zwischenpositionen mit den gleichzeitig einstellbaren Parametern Hub, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft sowie der Möglichkeit zur internen Sensorauswertung sind mechatronische Zweifingerparallelgreifer gerade für Handhabungsvorgänge bei hoher Variantenvielfalt, hohen Zyklenzahlen und vielen

Greifvorgängen ihren pneumatischen oder rein elektrischen Pendants überlegen und werden daher hier fokussiert.

Die Effizienzsteigerung in Form einer schnelleren Bereitstellung anwendungsgerechter Greiferfinger ist dann am größten, wenn der Anwender die Greiferfinger ohne zusätzliche Unterstützung erstellen kann. Die **Bedienung der Software** zur Ermittlung der Fingerkonfiguration muss daher möglichst **ohne Vorwissen** möglich sein. Die Praxistauglichkeit der Methode wird mit umfangreichen Absicherungsversuchen anhand repräsentativer Handhabungsobjekte evaluiert.

Greiferfinger sind im Handhabungssystem die einzigen Komponenten mit direktem Kontakt zum Handhabungsobjekt. Nutzt man hier Sensoren im Rahmen einer **Funktionsintegration**, können zusätzlich Informationen über das Handhabungsobjekt erfasst und zur Optimierung des Handhabungsprozesses genutzt werden.

Die Erstellung und Verbesserung modularer Produktstrukturen sind nicht einmalige Aktivitäten im Rahmen der Produktentwicklung, sondern umfassen die laufende Analyse der Produktstrukturen, die Bereinigung der internen Vielfalt sowie die frühe Identifikation neuer Produktvarianten. Im Hinblick auf eine modulare Produktstruktur für Greiferfinger muss daher eine **strukturierte Betrachtung der Baukastenoptimierung** erfolgen.

4.2 Einordnung und Betrachtungsraum der Methode

Die Methode zur automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger soll den Prozess der Greiferfingergestaltung beschleunigen und richtet sich an mehrere Nutzergruppen. Zur Konfiguration der Finger werden standardisierte Elemente benötigt, die miteinander zu spezifischen Fingervarianten verknüpft werden. Die Definition dieser Elemente sowie deren Zulassung für bestimmte Greifertypen ist die Aufgabe der Greiferhersteller und erfolgt im Rahmen der Entwicklung neuer Greifermodelle.

Die eigentliche Konfiguration der Greiferfinger erfolgt durch den Anwender und liefert ihm damit eine genaue Aufbauanleitung für einzelne Finger sowie eine Unterstützung bei der Automatisierung von Handhabungsaufgaben. Dieser Methodenteil wird immer dann eingesetzt, wenn für eine neue oder geänderte Handhabungsaufgabe passende Greiferfinger benötigt werden. Der Einsatz der Methode ist dabei offline, d.h. losgelöst und nicht während der Handhabungsoperation. Durch die Beschleunigung und

Vereinfachung der Fingerkonstruktion und -auswahl können so eine Vielzahl an Fingervarianten ermittelt, bewertet und verglichen werden.

Für die Einordnung der Methode und für eine spätere Vergleichbarkeit mit anderen Ansätzen, kann das Vorgehen anhand des vorhandenen Vorabwissens klassifiziert werden. Wolter et al. (1985) unterscheiden fünf Klassen von Handhabungsoperationen: Bei einer Handhabungsoperation der Klasse C0 ist kein Vorwissen vorhanden. Alle notwendigen Informationen zum Handhabungsobjekt und Umgebung müssen zur Laufzeit erfasst und verarbeitet werden. In Klasse C1 sind zwar die Geometrie, aber nicht die Umgebung bekannt. In Klasse C2 sind neben der Handhabungsobjektgeometrie auch teilweise die Hindernisse in der Umgebung bekannt. Es können Kollisionstests zwischen dem geplanten Griff und dem Handhabungsobjekt sowie Kollisionstests mit bekannten Objekten Offline durchgeführt werden. In der Klasse C3 sind alle relevanten Hindernisse bekannt und befinden sich keine unbekannt Objekte in der Nähe des Handhabungsobjekts. Für jede stabile Pose des Handhabungsobjekts kann vorbei der optimalen Griff ermittelt werden. Bei Handhabungsoperationen der Klasse C4 sind Handhabungsobjektgeometrie, -pose und alle Hindernisse bekannt. Hierdurch kann die gesamte Handhabungsoperation vorab ermittelt werden. Handhabungsoperationen, die bei der automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger berücksichtigt werden entsprechen der Klasse C2 oder C3 (Wolter, Volz & Woo, 1985, S. 206).

Tabelle 4-1: Klassifizierung von Handhabungsoperationen nach (Wolter, Volz & Woo, 1985)

Klasse	vorab verfügbares Wissen				Typische Anwendung
	Handhabungsobjektgeometrie	Handhabungsobjekt-konfiguration	Lokales Hindernis	Handhabungsobjekt-pose	
C0	x	x	x	x	Unstrukturiert
C1	✓	x	x	x	Griff in die Kiste
C2	✓	✓	✓ (teilweise)	✓	Teil von einem ungeordneten Tisch nehmen
C3	✓	✓	✓	x	Teil von geordnetem Tisch nehmen
C4	✓	✓	✓	✓	Maschinenentladung

Darüber hinaus werden für die weitere Ausführung die folgenden Einschränkungen und Annahmen getroffen:

- Betrachtung von Handhabungsobjekten, die sich mit einem Greifersystem handhaben lassen
- Betrachtung von mechatronischen Zweifingerparallelgreifern
- Beachtung von Sensorik im Greiferfinger
- Betrachtung von rein kraftschlüssigen Griffen
- Die Annäherung des Greifers an das Handhabungsobjekt erfolgt senkrecht von oben in negativer z-Richtung
- Betrachtung von Außengriffen
- Keine Beachtung der Bahnplanung bzw. des Anfahrweges
- Keine Betrachtung von biegeschlaffen, elastischen oder porösen Handhabungsobjekten
- Keine Betrachtung von Handhabungsobjekten im Mikrobereich (5 mm) oder kleiner

4.3 Ablauf der Methode

Die neu entwickelte Methode gliedert sich in drei Abschnitte, die in Abbildung 4-1 dargestellt sind. Der erste Abschnitt besteht in der Gestaltung eines Greiferfingerbaukastens. Aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Greifermodelle am Markt ist es unmöglich, einen Greiferfingerbaukasten für alle Greifer zu erstellen. Der erste Teil der Methode dient somit der Definition des Baukastenumfangs sowie der Baukastenelemente für einen gewissen Umfang an Greifern. Im Anschluss erfolgt in der zweiten Arbeitsphase die Bestimmung der Greifpositionen sowie die Ermittlung der Greiferfingerkonfigurationen. In dieser Synthese wird der Lösungsraum an Fingerkonfigurationen aufgespannt. Anhand einer objektiven Bewertung können dann im dritten Methodenteil Konfigurationen miteinander verglichen und der Lösungsraum systematisch eingeschränkt werden.

4.3.1 Baukastengestaltung

In der Phase der Baukastengestaltung werden die standardisierten Elemente definiert, aus denen dann die Greiferfinger konfiguriert werden können.

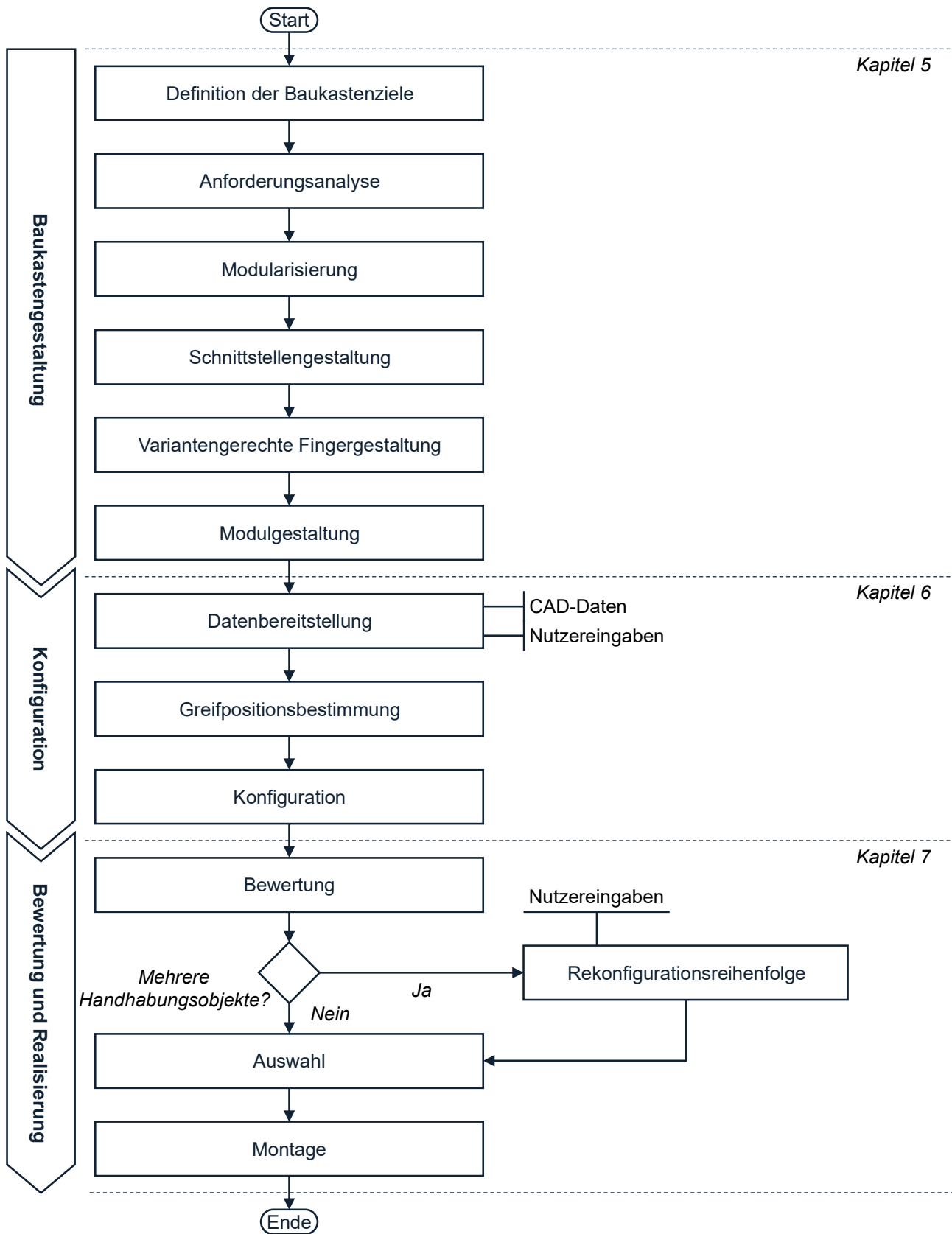


Abbildung 4-1: Übersicht über den Gesamtablauf der Methode

Wie oben erwähnt, kann aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Greifern und Handhabungsoperationen kein einzelner Baukasten definiert werden, der noch dem Grundsatz einer möglichst hohen externen Vielfalt bei möglichst geringer interner Vielfalt entspricht.

Schon die reine Existenz des Baukastens steigert den Mehrwert der Greifer, die mit dem Greiferfingerbaukasten kompatibel sind. Daher liegt es im Interesse der Greiferhersteller, den oder die Baukästen für einen gewissen Umfang an mechatronischen Zweifingerparallelgreifern zu definieren. Ziel der ersten Phase ist somit die Definition des Greiferfingerbaukastens für eine definierte Anzahl an Greifern als Grundlage für die Konfiguration.

4.3.2 Konfiguration

Die Baukastengestaltung gibt den Rahmen vor, in dem der Lösungsraum in Form von Greiferfingerkonfigurationen aufgespannt werden kann.

Als Synthese aus den Baukastenelementen werden zulässige Greiferfingerkonfigurationen erzeugt, die zur Durchführung einer Handhabungsoperation geeignet sind. Dieser Methodenabschnitt umfasst die automatisierte Analyse der CAD-Daten der Handhabungsobjekte und Randbedingungen, die Greifpositionsbestimmung und -bewertung sowie die Konfiguration durch Kombination der Baukastenelemente. Als Ergebnis liegen zwei Listen vor. Die erste Liste beschreibt die bewerteten Greifpositionen für die betrachteten Handhabungsobjekte. Die zweite Liste beschreibt die zulässigen Greiferfingerkonfigurationen, die für die Handhabungsobjekte mit Kontakt an den Greifpositionen gefunden wurden.

4.3.3 Bewertung und Realisierung

Um aus der Liste der zulässigen Konfigurationen die für den Anwender geeignetste Lösung zu identifizieren, werden die Konfigurationen mit verschiedenen Metriken bewertet. Die so ermittelte, beste Konfiguration wird dem Nutzer dann zusammen mit dem Greifermodell und Handhabungsobjekt visualisiert. Anhand der Visualisierung kann der Nutzer sowohl die Modulreihenfolge erkennen und den Finger aus den Baukastenelementen zusammenbauen als auch die Orientierung des Handhabungsobjekts nachvollziehen.

5 Baukastengestaltung

Als zentraler Schritt wird in der ersten Phase der Greiferfingerbaukasten definiert, der als Basis für alle folgenden Phasen gilt. Da die Gestaltung modularer Produktstrukturen schon ein verhältnismäßig gut erforschtes Feld ist, wird hier auf bestehende Methoden, die in Kapitel 2.4.2 beschrieben wurden, zurückgegriffen und diese werden für die Anwendung bei Greiferfingern adaptiert. Der Ablauf dieser Phase ist in Abbildung 5-1 dargestellt und wird im Folgenden ausführlich beschrieben.

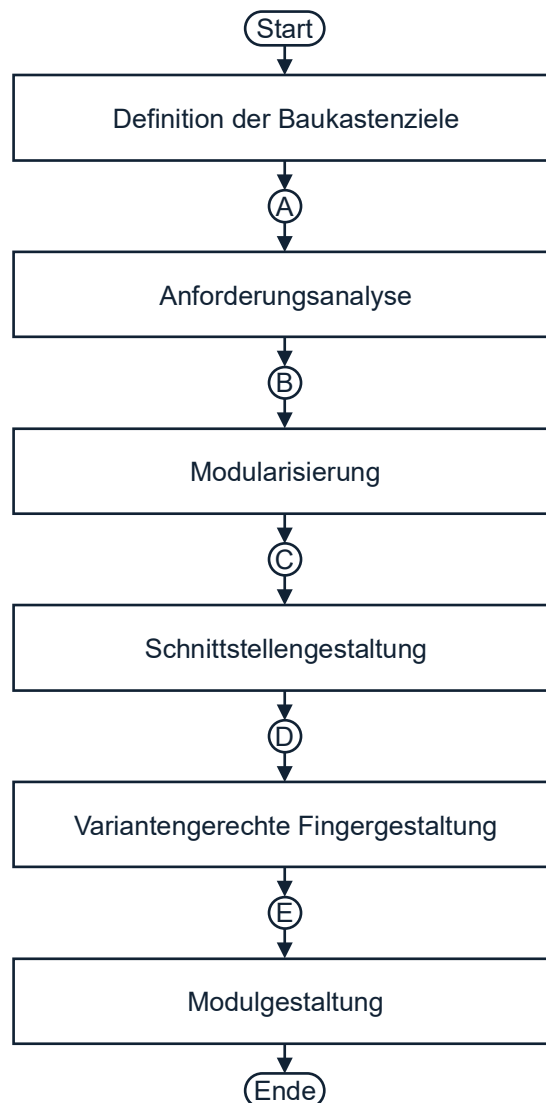


Abbildung 5-1: Ablauf der Baukastengestaltung

5.1 Definition der Baukastenziele

Die Definition konkreter Ziele ist der erste Schritt in der Entwicklung einer modularen Produktstruktur. Mit einem Baukasten können verschiedene Zielstellungen verfolgt werden, weshalb das erfolgreiche Entwickeln der modularen Produktstruktur an der Erreichung der zu Beginn definierten Ziele gemessen werden sollte. Zudem erfüllen verschiedene Baukastenausprägungen diese Ziele in unterschiedlichem Maße. Einen ersten Ansatz liefern die im Folgenden genannten, allgemeinen Zielsetzungen, von denen ausgehend individuelle Ziele definiert werden können.

Bedingt durch die extreme Vielfalt an Handhabungsaufgaben, für die alleine Parallelbackengreifer eingesetzt werden können, scheinen individuelle Finger der passende Ansatz zu sein, was sich sowohl in vorhandenen Ansätzen als auch industriellen Lösungen widerspiegelt. Jedoch erfolgt die Konstruktion und Fertigung dieser Finger in vielen Fällen individuell und passend zur Handhabungsaufgabe, was eine Wiederverwendung für andere Handhabungsaufgaben nahezu ausschließt. Mit modularen Greiferfingern hingegen wird versucht, einen hohen Individualisierungsgrad der Finger mit möglichst wenigen Modulen zu erreichen (**hohe externe Vielfalt bei geringer interner Vielfalt**). Darüber hinaus kann durch die Verwendung von Standardelementen mit klaren Schnittstellen die **Komplexität reduziert** werden. Zudem unterstützen modulare Greiferfinger **die Postponement-Strategie**, d.h. die Verlagerung der Variantendifferenzierung möglichst auf das Ende des Fingergestaltungsprozesses. Damit ist es möglich, einen Großteil der Komponenten für verschiedene Fingermodelle zu nutzen und nur durch z.B. eine individuelle Wirkfläche den Finger auf eine spezielle Handhabungsaufgabe anzupassen. Ein Zusammensetzen der Baukastenelemente zu einem fertigen Fingermodell **reduziert den Konstruktionsaufwand**. Individuelle Ergänzungen können an standardisierten Schnittstellen mit dem Rest des Fingers verbunden werden.

5.2 Anforderungsanalyse

Im Rahmen der Baukastenkonzeption müssen neben den zu erreichenden Zielen auch die Anforderungen, die mit dem Baukasten erfüllt werden sollen, definiert werden. Hierzu werden zunächst die Erwartungen der späteren Anwender an den Baukasten dokumentiert und auf Machbarkeit geprüft.

Diese Erwartungen können aus den Anforderungen an die zu konfigurierenden Greiferfinger abgeleitet werden. Allerdings würde das gesamte Spektrum potenzieller

Handhabungsaufgaben und verfügbarer Greifer zu einer unüberschaubaren Vielzahl an Anforderungen und damit zu einem nicht mehr beherrschbaren Komplexitätsgrad führen.

Um eine effiziente Baukastengestaltung sicherzustellen, wird daher in diesem Schritt bestimmt, welche Anforderungen und welche mit dem Baukasten kompatiblen Greifer im Hinblick auf die Zielsetzung relevant sind (s. Abbildung 5-2).

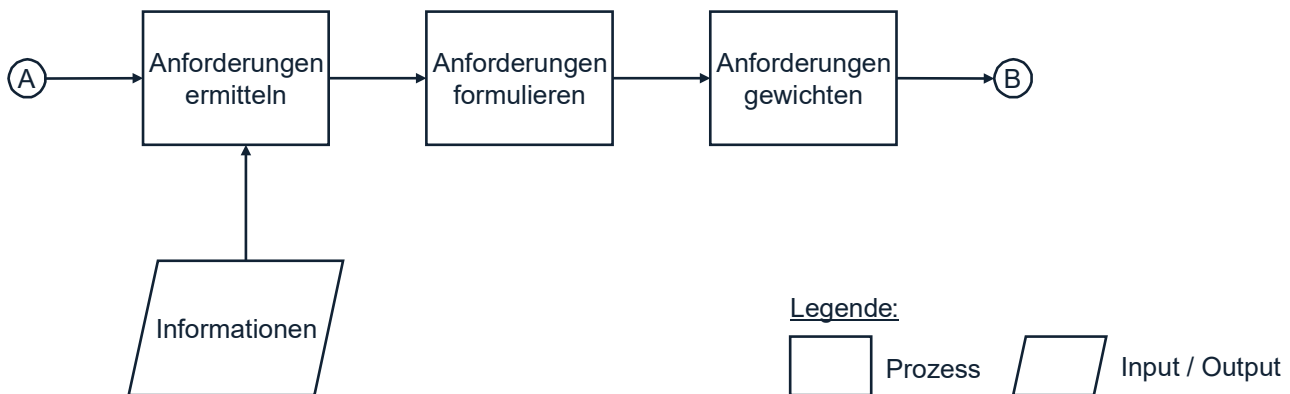


Abbildung 5-2: Vorgehen der Anforderungsanalyse

Die Quellen dieser Anforderungen sind meist heterogen, weshalb unstrukturierte Interviewprotokolle, Flipchartblätter, Literatur und sonstige Ergebnisartefakte einer Anforderungssammlung gefiltert und dokumentiert werden müssen. Um dabei den Spielraum für Interpretationen möglichst klein zu halten, gibt es im Requirements Management syntaktische Anforderungsschablonen, die allein die Syntax, aber nicht die Semantik einer Anforderung festlegen. Abbildung 5-3 zeigt den FunktionsMASTER¹³ nach Rupp (2021) für funktionale Anforderungen.

Der Betrachtungsgegenstand identifiziert das, wofür die Anforderung erfasst wird. Mit dem zweiten Baustein wird die rechtliche Verbindlichkeit definiert und damit, welche Anforderung bei knappem Zeit- oder Kostenrahmen für das Funktionieren des Systems unverzichtbar, auf welche unter bestimmten Umständen verzichtet werden kann und welche lediglich zukünftige Rahmenbedingungen und Anforderungen ankündigt. Der dritte Baustein identifiziert die Funktionalität, d.h. einen Vorgang oder Tätigkeit, die durch ein Vollverb beschrieben werden sollte. Eng damit verknüpft ist die Art der Funktionalität, die als selbsttätige Systemaktivität, durch Benutzungsinteraktion und in

¹³ MASTER steht für **M**ustergültige **A**nforderungen - die **S**ophist-**T**emplates für **R**equirements

Abhängigkeit von außen (Schnittstellenanforderung) auftreten kann. Abschließend wird das Objekt, für das die Funktionalität gefordert wird, definiert (Rupp, 2021, S. 31–32).

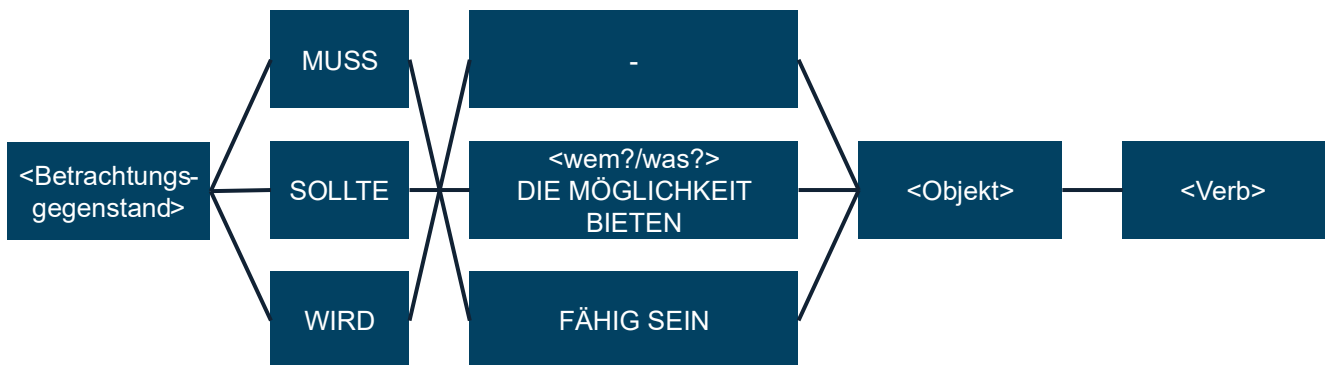


Abbildung 5-3: FunktionsMASTER ohne Bedingung als Schablone zur einheitlichen Formulierung von Anforderungen (eigene und veränderte Darstellung nach (Rupp, 2021, S. 361))

Anhand der zuvor definierten Ziele können die Anforderungen z.B. über einen paarweisen Vergleich oder eine Nutzwertanalyse priorisiert werden.

Ziel dieser Phase ist es, die Baukastenentwicklung so zu lenken, dass der Greiferfingerbaukasten die Erwartungen des Anwenders erfüllt, damit dessen Akzeptanz steigt und der Entwicklungsverlauf schlank gehalten werden kann.

5.3 Modularisierung

Die Modularisierung, also das Gliedern der Greiferfinger in austauschbare Funktionseinheiten, erfolgt nach technisch-funktionalen Gesichtspunkten. Die Funktionsorientierung ermöglicht die fingerübergreifende Realisierung gleicher funktionaler Anforderungen mit gleichen technischen Konzepten. Solche Konzeptstandards ermöglichen damit die Realisierung einer Vielzahl an Funktionen mit gleichen Funktionsträgern. Abbildung 5-4 zeigt den Ablauf der Modularisierung in abstrakter Form.

Dazu werden die ermittelten und gewichteten Anforderungen in einem House of Quality mit den technischen Merkmalen, d.h. im Wesentlichen Funktionen, der Finger verknüpft. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anforderungen von den technischen Merkmalen erfüllt werden. Ein Merkmal der Modularisierung nach technisch-funktionalen Gesichtspunkten ist die starke Verknüpfung von Funktionen innerhalb eines Moduls im Vergleich zu den Kopplungen zwischen Funktionen aus unterschiedlichen Modulen. Zur Darstellung der funktionalen Beziehungen wird eine zweidimensionale Design Structure Matrix (DSM) verwendet, die die Funktionen in Zeilen und Spalten gegenüberstellt.

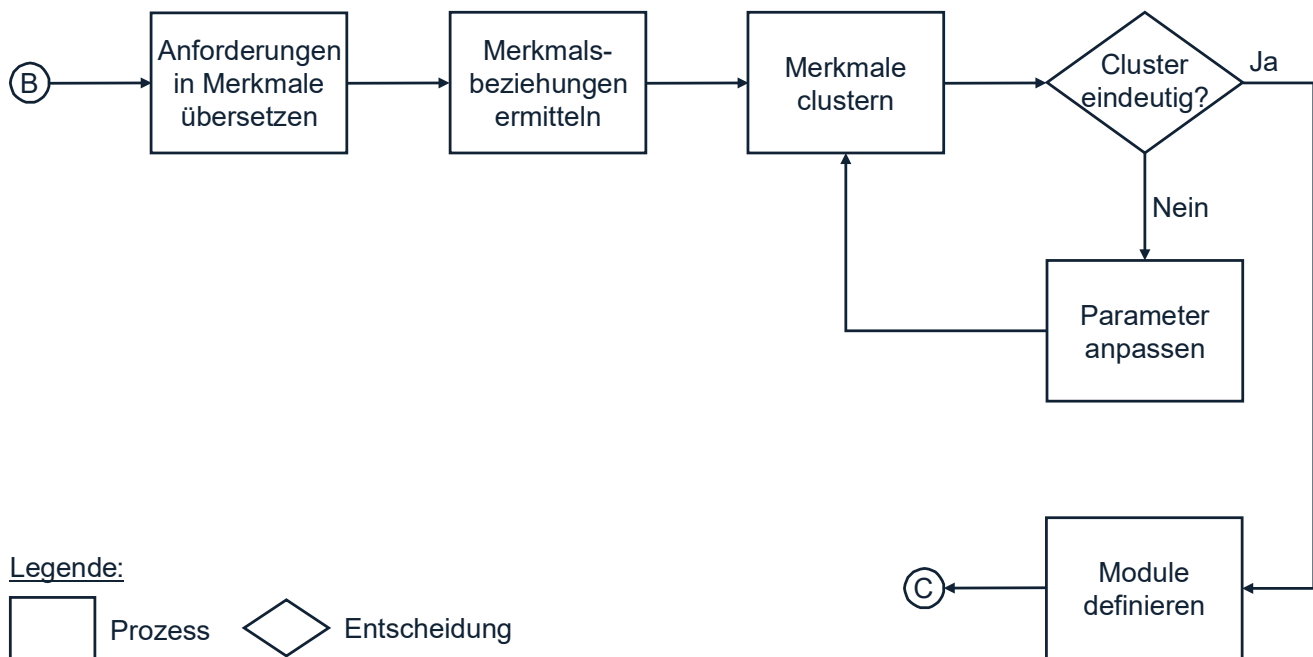


Abbildung 5-4: Vorgehen zur Modularisierung

Die Bewertung kann danach erfolgen, ob überhaupt eine Beziehung zwischen den Funktionen besteht oder auf Basis der Interaktionsstärke in den vier Kopplungsarten räumliche Anordnung, Energie, Information und Material. Da die Modularisierung eine erste Unterteilung in Module liefern soll, ist eine eindimensionale Bewertung nach folgendem Bewertungsschema ausreichend:

- 0,5 - schwache Interaktion/Abhängigkeit
- 1 - normale Interaktion/Abhängigkeit
- 2 - starke Interaktion/Abhängigkeit

Hauptvorteile dieser Systemmodellierung ist die einfache und prägnante Möglichkeit der Systemdarstellung sowie die Eignung für effiziente Analysen durch z.B. Clusterbildung. Einen ersten Entwurf der Modularisierung liefert die Anwendung des Idicula-Guertierrez-Thebeau-Algorithmus (IGTA), welcher die DSM-Elemente basierend auf den Beziehungen neu anordnet und so die Funktionen einem Modul zuordnet, die eine starke Abhängigkeit voneinander haben. Da bei der Anwendung des IGTA zufällig Funktionen (DSM-Elemente) ausgewählt werden, die dann einem Cluster zugeordnet werden, unterscheiden sich die Ergebnisse einzelner Durchläufe voneinander. Die Zuverlässigkeit der Clusterbildung wird über die Ähnlichkeit jedes Clusters mit den Clustern aller anderen Durchläufe ermittelt. Daraus kann dann eine durchschnittliche Ähnlichkeit der Cluster eines Laufes ermittelt werden. Weichen diese Durchschnittswerte über alle Durchläufe nur gering voneinander ab, so kann von einem verlässlichen

Ergebnis ausgegangen werden. Aus der Modulzuordnung des Cluster-Algorithmus kann dann ein Modulkonzept entwickelt werden. Abhängig von den Funktionen eines Clusters wird geprüft, welchen Fingerteil diese Funktionenschar betrifft. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Die Funktionen „Greifkraft des Greifers auf Finger übertragen“, „Verbindung zur Grundbacke herstellen“ und „Schnittstelle der Grundbacke in Modulschnittstelle übersetzen“ sind relevant für den Fuß des Greiferfingers. Sind sie einem Cluster zugeordnet, so kann der Greiferfingerfuß ein Modul bilden, welches diese Funktionen abbildet.

5.4 Schnittstellengestaltung

Die Standardisierung der Schnittstellen als Merkmal der Modularisierung ermöglicht erst die freie Kombinierbarkeit der Baukastenelemente (Salvador, 2007, S. 224). Eine Schnittstelle definiert den Bereich der Interaktion in Form einer Positionierung, eines Kraftflusses oder des Austauschs von Energie, Stoff oder Informationen zwischen zwei (Teil-) Systemen (Krause & Gebhardt, 2018, S. 93). Das zuvor ermittelte Modulkonzept wird verschiedene Schnittstellen, z.B. zwischen Greifer und Finger, zwischen den Modulen, oder auch zwischen Finger und Handhabungsobjekt aufweisen. Zudem wird neben der mechanischen Schnittstelle auch eine elektrische Schnittstelle zwischen den Modulen benötigt, um die zuvor erwähnte Funktionsintegration mit Sensoren zu realisieren. In Anlehnung an die Methode zur Gestaltung von Modulschnittstellen nach (Scalice, Andrade & Forcellini, 2008) zeigt Abbildung 5-5 das Vorgehen.

Einer Definition der Schnittstellenanforderungen folgt der Schnittstellen(system)-Entwurf, bei dem die Definition des Gesamtsystems „Greifer“ mit allen Subsystemen zur Veranschaulichung der erforderlichen Schnittstellen erfolgt. In einem domänenspezifischen Entwurf werden mechanische und elektrische Schnittstelle zunächst getrennt voneinander betrachtet, Konzepte entwickelt und miteinander verglichen. Eine abschließende Auswahl erfolgt nach der Systemintegration beider Schnittstellenkomponenten.

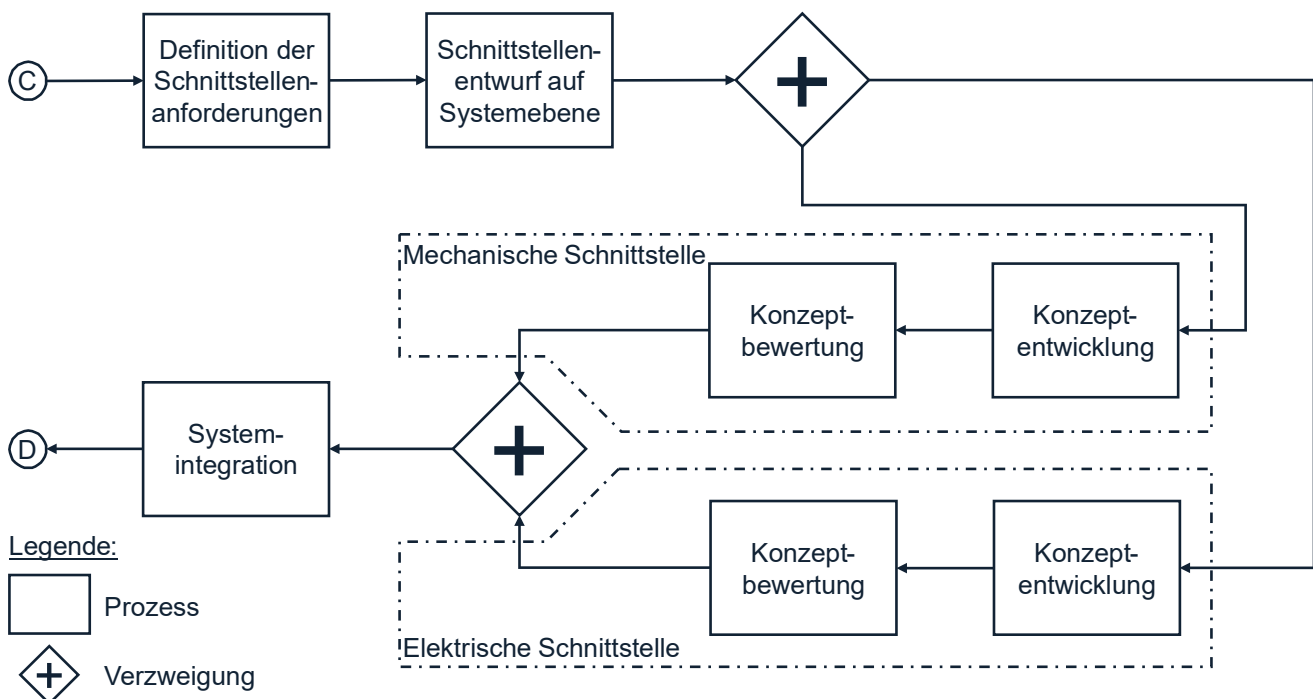


Abbildung 5-5: Vorgehen zur Schnittstellengestaltung

5.5 Variantengerechte Fingergestaltung

Mit der funktionsorientierten Modularisierung kann eine Zerlegung von Greiferfingern in Module erreicht werden. Damit ist klar, wie viel unterschiedliche Modultypen benötigt werden, um die geforderten Funktionen zu erfüllen. Aus der bisherigen Schnittstellengestaltung geht zudem hervor, welche Schnittstellen vorgesehen werden müssen, und welche Komponenten hierfür eingesetzt werden können. Die physische Ausgestaltung und hierarchische Zusammensetzung des Baukastens und damit auch eines einzelnen Fingers wird durch die Produktstruktur beschrieben. Diese sollte möglichst variantengerecht gestaltet sein, d.h. eine möglichst große externe Variantenvielfalt sollte mit Hilfe einer möglichst kleinen internen Vielfalt realisiert werden. Mit der methodischen Vorgehensweise zur variantengerechten Produktgestaltung nach Kipp (2012) kann die Vielfalt an Komponenten reduziert werden, die für eine geforderte Variantenvielfalt nötig ist. Dabei wird, wie in Kapitel 2.4.2.4 beschrieben, die schrittweise Annäherung an ein konsolidiertes Idealbild versucht. Das Idealbild entsteht durch die Untersuchung der Produktstruktur anhand der folgenden vier Kriterien (Kipp, 2012, S. 64; A_Meschter, 2021, S. 34):

- Differenzierung in Standard- und Variantenkomponenten
- Reduzierung zum Träger eines Unterscheidungsmerkmals

- Eins-zu-eins-Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen zu Variantenkomponenten
- Entkopplung der Variantenkomponenten

Abbildung 5-6 zeigt das Vorgehen in Anlehnung an die Methodenbausteine der Vorgehensweise nach Kipp (2012), das im Folgenden und ergänzend zu Kapitel 2.4.2.4 näher beschrieben wird:

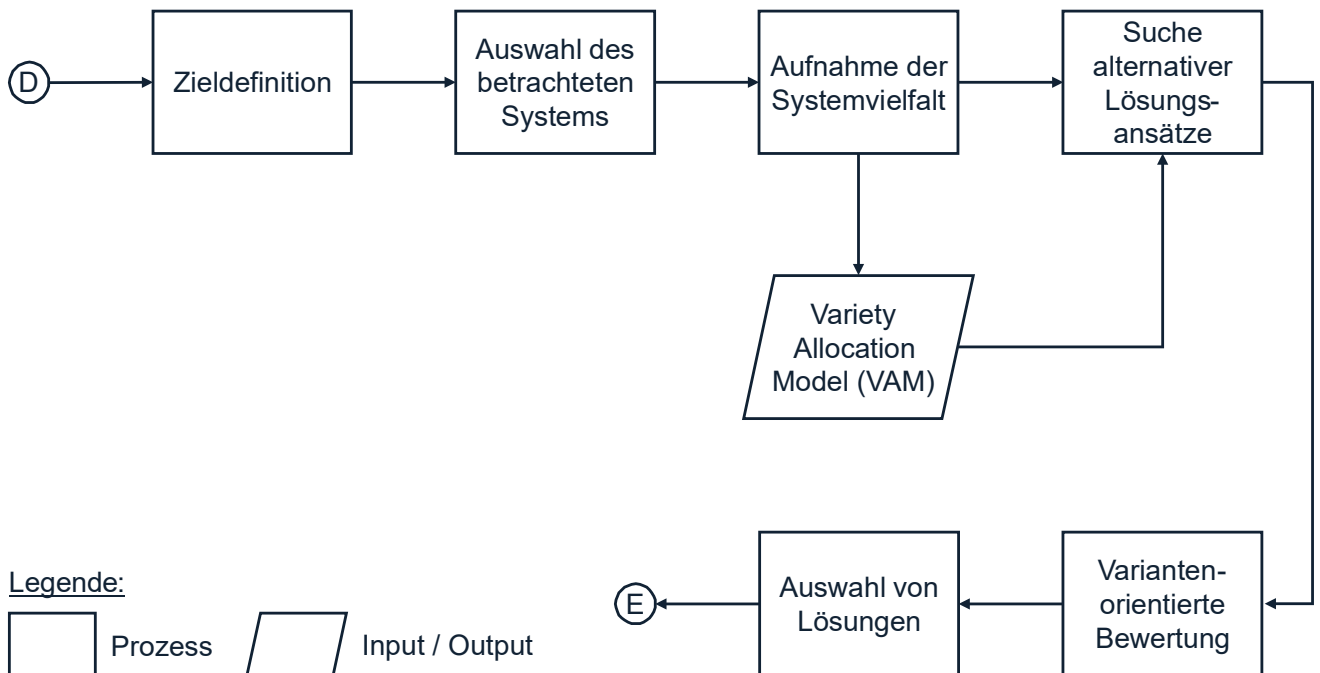


Abbildung 5-6: Vorgehen zur Steigerung der Variantengerechtigkeit

Die Entwicklung eines Anwenderbaukastens für Greiferfinger mit einer minimalen Anzahl von Modulen für eine festgelegte maximale Variantenvielfalt an Greiferfingern wird im ersten Schritt als Ziel der variantengerechten Produktgestaltung definiert. Die festgelegte maximale (geometrische) Variantenvielfalt an Greiferfingern wird von den Greiferherstellern durch den Zusammenhang zwischen Fingerauskrägung und Fingerlänge definiert. Hierdurch ergibt sich ein Bereich, in dem alle zulässigen Greiferfingervarianten liegen. Aus den in Kipp (2012) definierten allgemeinen Zielen können weitere untergeordnete Ziele abgeleitet werden:

Durch eine große Variantenvielfalt, die mit dem Baukasten abgedeckt werden soll, kann die kundenindividuelle Herstellung von Greiferfingern oder der auftragspezifische Konstruktionsaufwand beim Greiferhersteller reduziert werden. Neue Greiferfinger entstehen damit vorwiegend durch **Konfiguration statt Konstruktion**. Mit einer **Erhöhung von Standardumfängen in den Modulen** können zudem Skaleneffekte erzielt und

Stückkosten reduziert werden (Meschter, 2021, S. 37). Eine **Reduzierung der internen Vielfalt** kann die Komplexität der Module und damit den Konstruktionsaufwand und die Stückkosten steigern, weshalb bei der Entwicklung der Module auch die **Komplexitätsreduzierung** betrachtet werden muss. Im Anschluss an die Zieldefinition werden die Baugruppen eines Produktes bestimmt, auf die bei der Gestaltung besonderes Augenmerk gelegt werden muss, um die Zielsetzung zu erreichen. Der einfache Aufbau der Greiferfinger aus einigen Modulen ermöglicht die vollständige Betrachtung aller Module. Daher wird darauf verzichtet, die variantengerechte Produktgestaltung zu beschränken und die in diesem Schritt vorgesehene Portfolio-Analyse wird nicht angewendet. Neben dem System selbst werden in diesem Schritt zusätzliche Randbedingungen festgelegt, die die Gestalt und die Einsatzmöglichkeiten des Baukastens bestimmen. Dazu zählen die Greifermodelle, für die der Baukasten geeignet sein soll, die Montage der Finger oder auch die Qualifikation der Anwender, was sich beispielsweise auf die Komplexität auswirkt.

In einem Variety Allocation Model (VAM) wird die Vielfalt eines bestehenden Systems analysiert und dokumentiert. Existiert kein bestehendes Produkt, welches analysiert werden kann, so kann auf ein verwandtes Produkt zurückgegriffen werden. Die ideale VAM-Struktur sieht eine Eins-zu-eins-Zuordnung zwischen Unterscheidungsmerkmal und Komponente über die Ebenen Funktionen und Wirkprinzipien/-elemente vor. Durch eine variantengerechtere Gestaltung kann eine Annäherung des erstellten VAM an das Idealbild erfolgen. Dafür werden im nächsten Schritt beginnend auf der untersten Ebene (Komponenten) alternative, variantengerechtere Lösungen gesucht. Auf jeder Ebene werden unterschiedliche Aspekte der Variantengerechtheit adressiert: So wird auf der untersten Ebene versucht die technische Vielfalt zu eliminieren, ungünstige Komponenten zu differenzieren Komponenten zusammenzufassen, die von den gleichen Unterscheidungsmerkmalen beeinflusst werden (Kipp, 2012). Die so identifizierten Lösungskonzepte öffnen einen Lösungsraum aus dem dann in einem objektiven und subjektiven Bewertungsschritt eine Auswahl getroffen wird. Dies führt zu Veränderungen im VAM, dass wiederum die Veränderung hin zu einem variantengerechteren Greiferfingerbaukasten zeigt.

5.6 Modulgestaltung

Die bis hierhin durchlaufenen fünf Schritte der Baukastengestaltung legen den Gestaltungsspielraum fest. Innerhalb dieser Grenzen können in einem abschließenden Schritt

dann die einzelnen Modultypen auskonstruiert werden. Ergebnis des Vorgehens ist ein methodisch entwickelter Greiferfingerbaukasten, der durch die Funktionsorientierung den Wert der zu entwickelnden Funktionen für den Anwender in den Mittelpunkt stellt.

6 Konfiguration

Die Konfiguration der Finger soll entsprechend einer Handhabungsaufgabe aus dem zuvor entwickelten Greiferfingerbaukasten erfolgen. Abbildung 6-1 zeigt den Ablauf der Konfiguration.

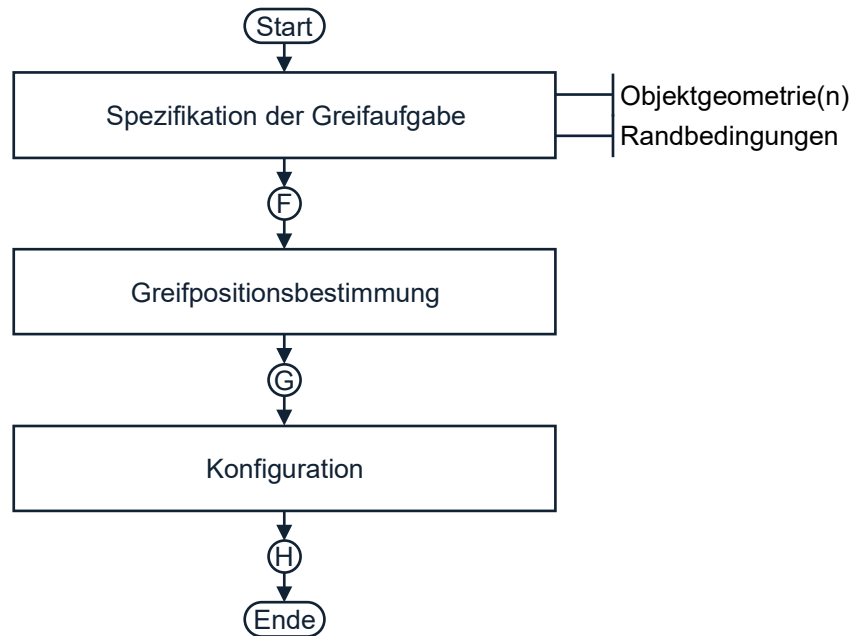


Abbildung 6-1: Ablauf der Fingerkonfiguration

Die Greifaufgabe als Teil der Handhabungsaufgabe wird definiert über das/die zu handhabende(n) Objekt(e) und die daran zu erreichenden Greifpositionen. Grundlage für beides ist die Spezifikation der erforderlichen Informationen über

- den Inhalt des Baukastens,
- die Handhabungsobjekte,
- den zu verwendenden Greifer.

6.1 Spezifikation der Greifaufgabe

Im ersten Schritt der Konfiguration werden alle für den weiteren Prozess notwendigen Informationen gesammelt. Dies umfasst den Baukastenumfang und seine Elemente sowie den verwendeten Greifer die Geometrien der Handhabungsobjekte. Damit werden die Rahmenbedingungen für die Schritte der Greifpositionsbestimmung und Fingerkonfiguration festgelegt.

6.2 Greifpositionsbestimmung

Ziel der Greifpositionsbestimmung ist es, Greifpositionen an den Handhabungsobjekten zu identifizieren und diese zu bewerten. Abbildung 6-2 zeigt den Ablauf. Dieser beginnt mit der Auswahl des nächsten Objekts aus der Liste an Objekten, die der Nutzer zuvor ausgewählt hat. Als Input werden in diesem Schritt Informationen zur Handhabungsaufgabe wie der verwendete Greifer sowie Informationen zur Parametrisierung der Greifpositionsbestimmung benötigt. Zu letzterem gehören die Auflösung der Punktwolke und die Anzahl der zu findenden Griffe am Objekt.

Verfolgt wird ein analytischer Ansatz, basierend auf den CAD-Daten der Handhabungsobjekte. Dazu wird für das betrachtete Handhabungsobjekt sowohl ein Netzflächenmodell als auch eine Punktwolke erstellt. Das Netzflächenmodell stellt die Oberfläche des Objekts durch eine Vielzahl von Dreiecken dar. Zur Erzeugung der Punktwolke werden die Eckpunkte des Netzflächenmodells ausgewählt, wobei darauf geachtet wird, dass der Abstand zwischen benachbarten Punkten möglichst konstant bleibt, um einen gleichmäßigen Detaillierungsgrad auf der gesamten Objektoberfläche sicherzustellen (A_Liu, 2021, S. 36–38). Auf Basis des Netzflächenmodells und der Punktwolke erfolgt im nächsten Schritt die Bestimmung aller potenziellen Greifpositionen. Hierfür wird zu jedem Punkt der Punktwolke der jeweils antipodische Punkt ermittelt, das heißt, es werden die Punkte identifiziert, die dem gewählten Punkt auf der Objektoberfläche gegenüberliegen. Zwischen diesen Punktpaaren lässt sich eine gerade Linie ziehen, die durch den geometrischen Mittelpunkt des Objekts verläuft. Sobald ein Punkt dieses erste Kriterium erfüllt, werden weitere Kriterien überprüft: Weisen die Normalenvektoren beider Punkte eine Winkelabweichung von größer als drei Grad auf, so wird dieses Punktepaar aussortiert. Gleiches gilt für die Winkelabweichung zwischen den einzelnen Normalenvektoren und der Verbindungslinie zwischen den Punkten. Da hier, je nach Handhabungsobjekt, andere Gegebenheiten vorliegen, wird die maximale Winkelabweichung zunächst auf 15 Grad festgelegt. Abbildung 6-3 zeigen die beiden Prüfungen zur Veranschaulichung für einen Griff im 2D-Raum. Die Prüfungen sind auch im dreidimensionalen Raum anwendbar. Entsprechend des in Kapitel 4.1.1 definierten Betrachtungsraumes werden Innengriffe und Greifpunktpaare, deren Abstand die maximale Öffnungsweite des gewählten Greifers überschreiten, ausgeschlossen (A_Liu, 2021, S. 38–45).

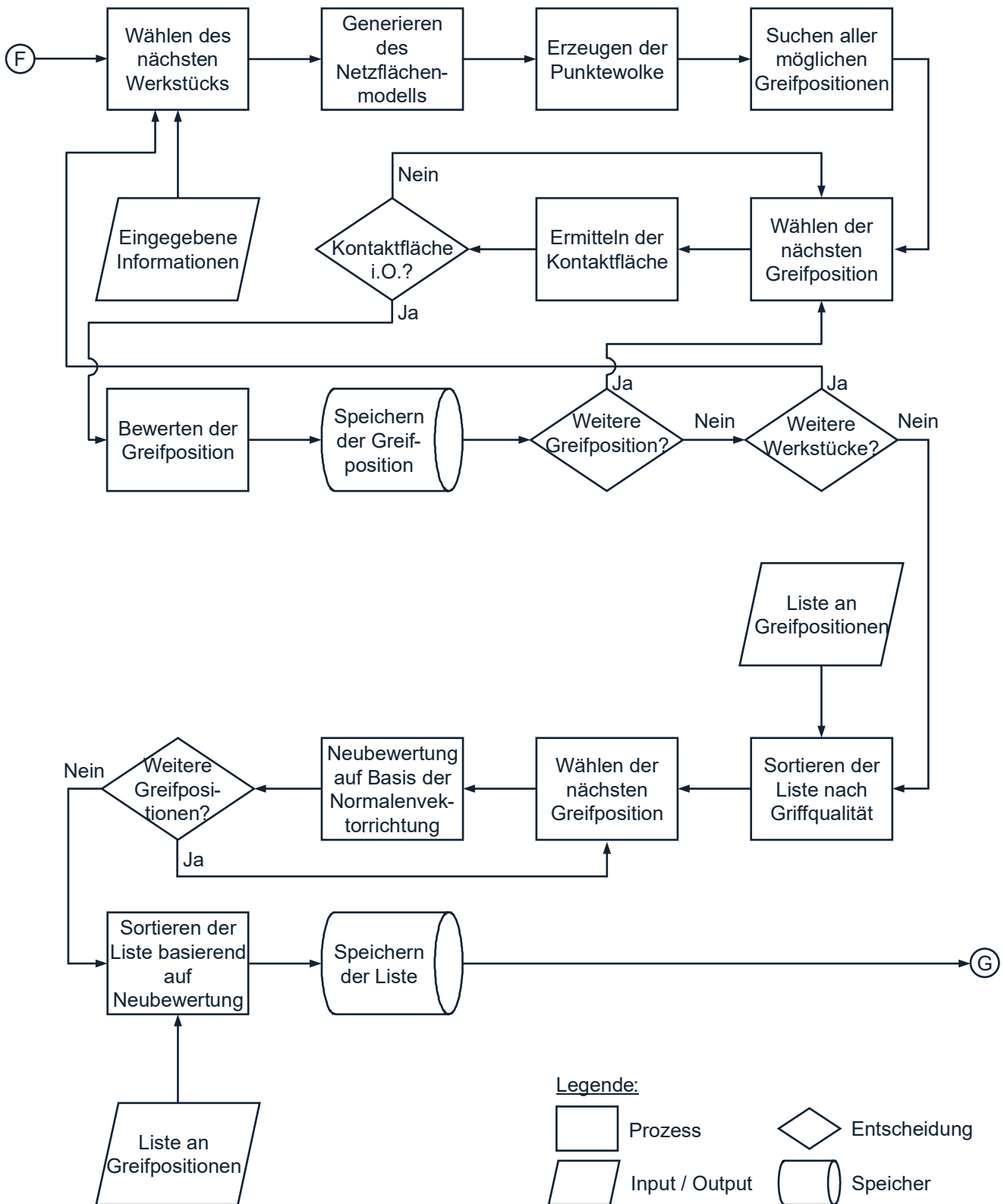


Abbildung 6-2: Ablauf der Greifpositionsbestimmung (eigene und veränderte Darstellung nach (Friedmann et al., 2023, S. 7))

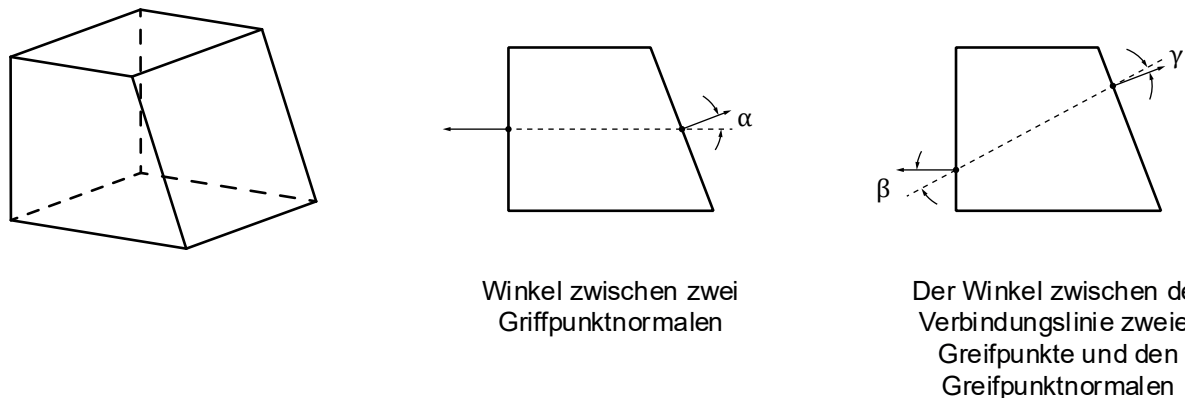


Abbildung 6-3: Überprüfung der Winkel zwischen den Normalenvektoren von Greifpunkten auf gegenüberliegenden Oberflächen eines Objekts (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Liu, 2021, S. 44))

Ergebnis ist zunächst eine Liste zulässiger Greifpunktpaare bezogen auf das Objektkoordinatensystem, die für die Handhabung prinzipiell geeignet sind. Im Hinblick auf die Griffstabilität sollte der Kontakt zwischen Finger und Objekt mindestens ein Linien-, besser noch ein ausreichend großer Flächenkontakt sein. Es muss also geprüft werden, ob die Flächen rund um die Greifpunkte ausreichend groß sind (A_Liu, 2021, S. 45). Jeder gefundene Greifpunkt befindet sich auf einem Dreieck des Netzflächenmodells. Die mögliche Kontaktfläche des Greiferfingers um den Greifpunkt herum kann also alle benachbarten Dreiecke des Dreiecks mit dem Greifpunkt umfassen, die komplanar mit diesem sind. Nachdem das Dreieck identifiziert ist indem sich der Greifpunkt befindet, können iterativ die drei an das Ausgangsdreieck angrenzenden Dreiecke auf ihre Komplanarität mit dem Ausgangsdreieck geprüft werden. Trifft dies auf mindestens ein Dreieck zu, erfolgt die nächste Iteration, in der die beiden benachbarten Dreiecke der komplanaren Nachbarn des Ausgangsdreiecks überprüft werden. So kann die mögliche Kontaktfläche schrittweise erweitert werden. Nach Abschluss der Iterationen ergibt die Summe der Flächeninhalte aller komplanaren benachbarten Dreiecke die maximal nutzbare Kontaktfläche (Friedmann et al., 2023, S. 8; A_Liu, 2021, S. 47).

Mathematisch entspricht dies einem ternären Suchbaum, indem jeder Knoten ein Dreieck repräsentiert. Bei jeder Iteration werden die Dreiecke (Baumknoten) eliminiert, die nicht komplanar zum Ausgangsdreieck (Wurzelknoten) sind. Für jede neue Iteration müssen auch die Knoten ausgeschlossen werden, die bereits überprüft wurden, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Nach Abschluss der Baumsuche ist jeder verbleibende Knoten der Index eines komplanaren Dreiecks. Die so ermittelte Kontaktfläche muss mit der des Greiferfingers abgeglichen werden. Dazu können sowohl die

Kontaktfläche auf dem Handhabungsobjekt als auch die Kontaktfläche am Greiferfinger als Polygone betrachtet werden. Die gefundenen Greifpositionen können anhand der sich überlappenden Fläche beider Polygone bewertet werden: Je größer die sich überlappende Fläche beider Polygone ist, desto größer ist der Flächenkontakt zwischen Greiferfinger und Handhabungsobjekt. Zusätzlich zur Kontaktfläche als Bewertungskriterium einer Greifposition wird die Griffqualität anhand des Balkriteriums ermittelt. Das Produkt beider Größen ergibt eine Bewertungszahl, die umso besser ist, je höher sie ist. Nach Überprüfung aller möglichen Greifpositionen ergibt sich eine Liste an zulässigen Greifpositionen, die nach der Größe der Kontaktfläche und der Griffqualität bewertet sind. Je nach Geometrie des Handhabungsobjekts und Aufbau der STL-Datei kann es vorkommen, dass die gewünschte Anzahl an Greifpositionen alle auf der gleichen Seite des Handhabungsobjektes liegen (Abbildung 6-4a). Liegen alle für die Konfiguration berücksichtigten Greifpositionen auf der gleichen Oberfläche des Handhabungsobjekts, so ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass gleiche Fingerkonfigurationen für mehrere Objekte gefunden werden sehr gering (A_Liu, 2021, S. 45–56).

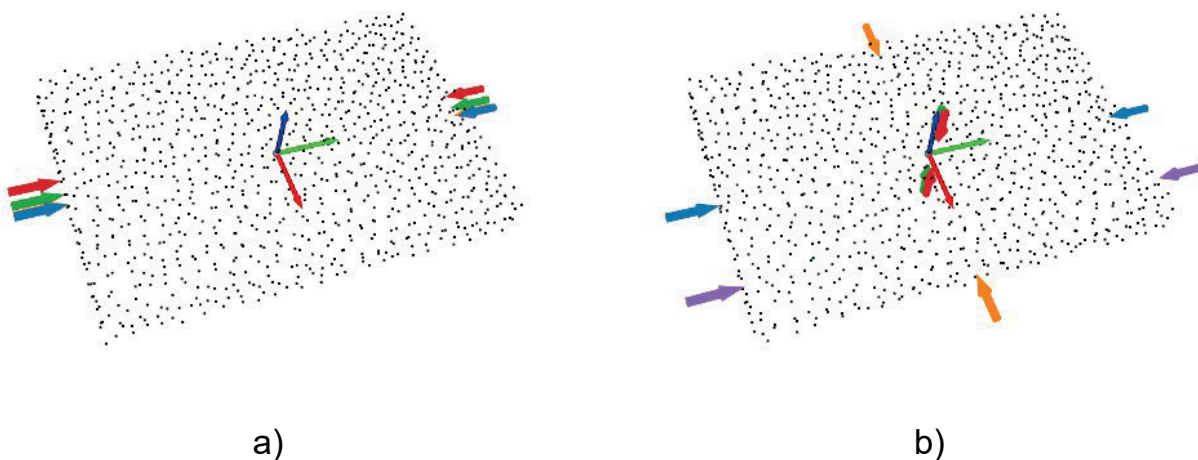


Abbildung 6-4: Visualisierung der besten fünf Greifpositionen an einem Quader einmal unter der alleinigen Berücksichtigung der Griffqualitätskriterien (a) und unter Berücksichtigung von Greifpositionen auf unterschiedlichen Seiten des Objekts (b)

Der Lösungsraum bei der Greiferfingergestaltung wird also erheblich eingeschränkt. Anders als bestehende Ansätze, die versuchen die besten Greifpositionen hinsichtlich z.B. der Griffqualität zu bestimmen, werden hier die besten Greifpositionen hinsichtlich der Griffqualität und größten Kontaktfläche auf möglichst unterschiedlichen Oberflächenteilen der Handhabungsobjekte gesucht (Abbildung 6-4b). Um also möglichst viele unterschiedliche Greifpositionen zu ermitteln, müssen die Normalenvektoren von Greifpositionen mit denen von schon ermittelten Greifpositionen verglichen werden.

Stimmen die Normalenvektoren überein, muss dies in der Bewertung sanktioniert werden. Hierfür wird der Betrag des Kreuzproduktes der Normalenvektoren von zwei Greifpositionen verwendet. Der Betrag eines Kreuzproduktes von zwei Vektoren, die in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung zeigen, ist Null. Mathematisch lässt sich das Strafmaß wie folgt ermitteln:

$$\lambda = 1 - |\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2| = |\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2| \cdot \cos\varphi \quad 6-1$$

mit den beiden Normalenvektoren \vec{n}_1 und \vec{n}_2 sowie den von beiden Vektoren eingeschlossenen Winkels φ

Zeigen einer der Normalvektoren der Greifposition und ein Normalenvektor einer zuvor betrachteten Greifposition in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung, ist das Strafmaß 0. Je größer die Abweichung der beiden Normalvektoren zueinander, desto größer das Strafmaß. Das Strafmaß wird der Bewertung hinzugefügt, sodass für jede Greifposition eine Bewertung als Produkt aus der Größe der Flächenüberschneidung A von Greifposition und Wirkfläche am Greiferfinger, dem ε -Wert für die Griffqualität und dem Strafmaß λ ermittelt werden kann.

$$\text{Bewertungszahl} = A \cdot \varepsilon \cdot \lambda \quad 6-2$$

Je größer diese Bewertungszahl ist, desto besser ist diese Greifposition für die Konfiguration geeignet. Der nach der Bewertung sortierten Liste können dann die besten Greifpositionen an unterschiedlichen Stellen des Handhabungsobjekts entnommen werden (Friedmann et al., 2023, S. 8).

6.3 Konfiguration

Die Konfiguration ermittelt durch das Zusammensetzen der im Baukasten definierten Standardkomponenten anwendungsspezifische Greiferfinger, die für die Handhabung der vom Anwender spezifizierten Handhabungsobjekte geeignet sind und berücksichtigt dabei geltende Konfigurationsregeln.

Für die Konfigurationslogik ist der kombinatorische Umfang, d.h. die Vielfalt aller möglichen Konfigurationen des Problems relevant. Diese kann anhand eines abgeschätzten Baukastenumfangs und unter Berücksichtigung des strukturellen Aufbaus eines Greiferfingers (siehe 2.3.1) hergeleitet werden:

Die Greiferfinger können als symmetrisch angenommen werden. Dadurch kann der Baukastenumfang halbiert werden, sodass nur ein Finger die Vielfalt aller möglichen Modulkombinationen bestimmt. Unabhängig von der genauen Definition des Baukastens kann davon ausgegangen werden, dass für den Anschluss am Greifer ein Basismodul benötigt wird. Die Art dieses Moduls wird durch den Greifer und dessen Anschlussbild für den Finger bestimmt. Gleiches gilt für die Wirkfläche, die Teil eines weiteren Moduls sein sollte, um die Größe des Baukastens zu begrenzen. Die Art dieses Moduls bestimmt dabei die Greifapplikation selbst, sodass das Modul kein freier Parameter einer Konfiguration ist. Der Aufbau einer Konfiguration kann als Ziehen von Modulen aus einem Baukasten mit einer begrenzten Anzahl an Modulen ohne Zurücklegen unter Beachtung der Reihenfolge betrachtet werden (A_Klumpf, 2021, S. 26–27). Die Kombinationsmöglichkeiten können wie folgt ermittelt werden:

$$N = 1 \cdot \frac{n!}{(n - (k - 2))!} \cdot 1 \quad 6-3$$

mit der Anzahl möglicher Kombinationen N , der Anzahl frei kombinierbarer Module aus dem Baukasten n und der Anzahl der Module an einem Finger k . Die vom Greifer und der Applikation bestimmten Basis- und Wirkflächenmodule tragen nicht zur Erhöhung der Variantenvielfalt bei. Abhängig von der Größe des Baukastens variiert die Anzahl an frei kombinierbaren Modulen n . In einer ersten Abschätzung wird von einer Anzahl an zehn frei kombinierbaren Modulen ausgegangen. Die Anzahl möglicher Kombinationen ergibt sich damit zu:

$$N = 1 \cdot \frac{10!}{(10 - (k - 2))!} \cdot 1 \quad 6-4$$

Tabelle 6-1 zeigt die Auswertung der kombinatorischen Vielfalt für variable Modulanzahlen. Die kombinatorische Vielfalt nimmt mit der Anzahl der Module pro Finger zu. Für den Sonderfall der Permutation ($k = 12$) ergeben sich 3.628.800 Kombinationen. Nach Elimination redundanter Kombinationen und unter Berücksichtigung variabler Modulanzahlen kann der Umfang der Kombinationsmöglichkeiten noch reduziert werden.

Tabelle 6-1: Kombinatorischen Vielfalt für variable Modulanzahlen

k	N (mit Redundanz)
1	0,09
2	1
3	10
4	90
5	720
6	5.040
7	30.240
8	151.200
9	604.860
10	1.814.400
11	3.628.800
12	3.628.800

6.3.1 Modulbeschreibung

Der später konfigurierte Greiferfinger kann als kinematische Kette der Greiferfingermodule beschrieben werden, die an ihren Schnittstellen miteinander verbunden sind. Die Ausgangsschnittstelle eines Moduls ist mit der Eingangsschnittstelle des nächsten Moduls in der Kette verbunden. Im Hinblick auf ein einheitliches Beschreibungsmodell für alle Modultypen müssen die Besonderheiten der einzelnen Module berücksichtigt werden. Dazu zählen neben der Außenkontur der Module auch die Art, Lage und Orientierung der Ein- und Ausgangsschnittstellen zueinander, was in Abbildung 6-5 dargestellt ist. Zur Beschreibung der Zusammenhänge wird das Modul-Basiskoordinatensystem \tilde{A} unter folgenden Konventionen eingeführt (A_Klüpfel, 2021, S. 30):

- Der Ursprung liegt im Mittelpunkt des Modulquerschnitts der Eingangsschnittstelle.
- Die y-Achse zeigt bei einer Montage des Moduls auf einem Basismodul entlang der Greifachse von der Mitte des Greifers weg
- Die z-Achse steht senkrecht auf der Ebene der Eingangsschnittstelle und zeigt in das Modul hinein
- Die x-Achse ergibt sich durch das orthonormale Basissystem.

In der Mitte der Oberfläche der Ausgangsschnittstelle ergibt sich das Koordinatensystem \tilde{B} , welches die translatorischen Freiheitsgrade x , y , z und, je nach Ausgestaltung der Modulschnittstelle, auch die rotatorischen Freiheitsgrade α , β , γ der Module bei der Montage einschränkt. Die Lage von \tilde{B} kann mit dem Positionsvektor \vec{p} relativ zur

Eingangsschnittstelle beschrieben werden und die Orientierung von \tilde{B} relativ zu \tilde{A} entspricht der Rotationsmatrix R (Friedmann et al., 2023, S. 12; A_Klüpfel, 2021, S. 31).

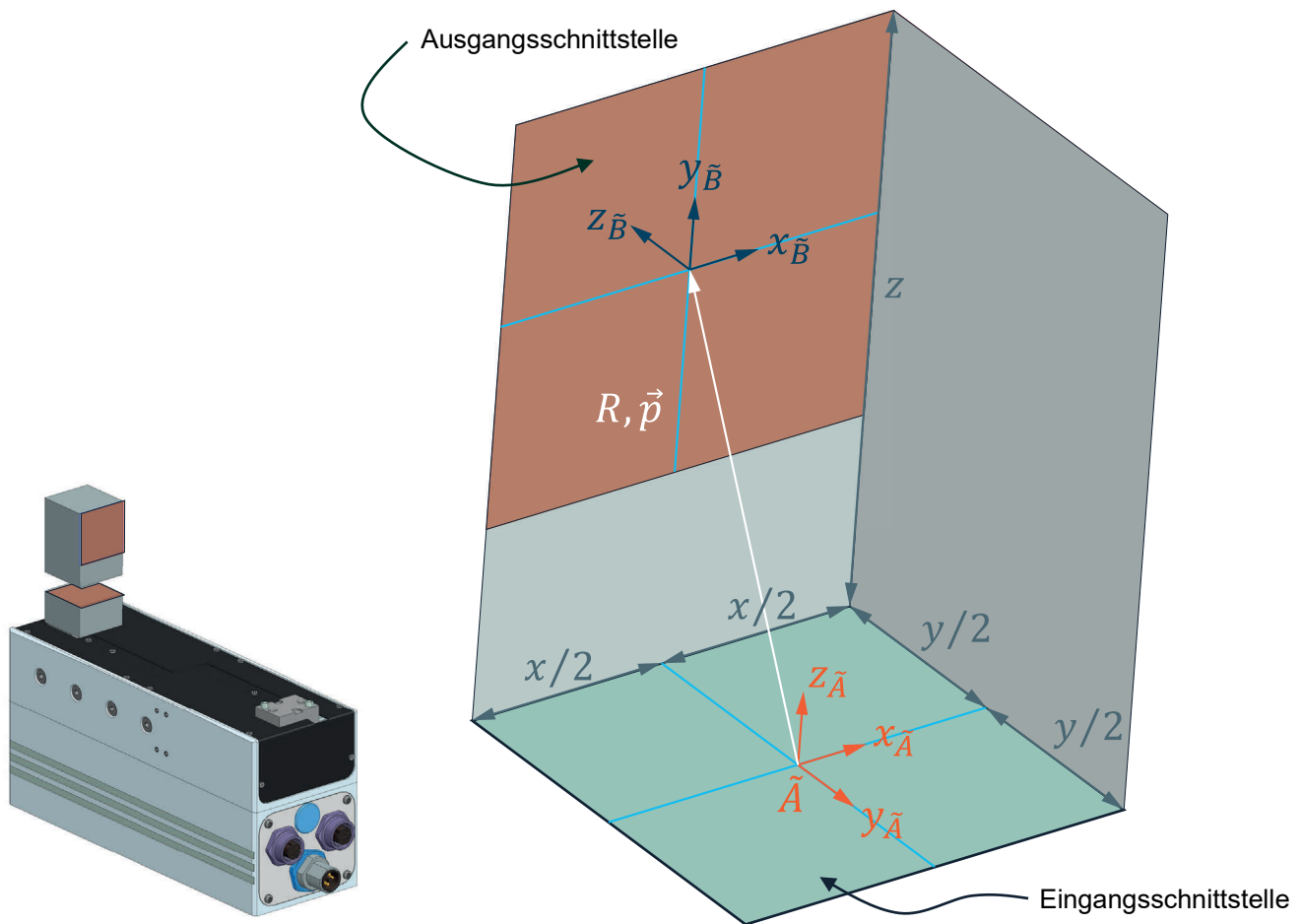


Abbildung 6-5: kinematische Modulbeschreibung zur Beschreibung der relativen Lage des Ausgangskoordinatensystems \tilde{B} zum Eingangskoordinatensystem \tilde{A} eines Moduls (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 30))

6.3.2 Formulierung der kinematischen Kette

Mit der in 6.3.1 eingeführten Modulbeschreibung kann ein Finger gemäß den Regeln der Vorwärtskinematik als serielle Aneinanderreihung von Modulen beschrieben werden. Die Funktionalität eines solchen Fingers, z.B. hinsichtlich der Erreichbarkeit einer Greifposition am Handhabungsobjekt, kann nur dann bewertet werden, wenn der Finger hinsichtlich eines Referenzkoordinatensystems ausgewertet werden kann. Hierfür wird das von vielen Greiferherstellern verwendete Greiferkoordinatensystem \tilde{G} (s. Abbildung 6-6) verwendet (A_Klüpfel, 2021, S. 34).

Der Ursprung des Greiferkoordinatensystems \tilde{G} liegt auf der Höhe der Schnittstelle des Greifers zum Finger und mittig auf dem Greifer. Die x-Achse bildet die Greifachse, auf

der sich die Grundbacken des Greifers translatorisch bewegen. Der maximale Backenhub des jeweiligen Greifers begrenzt dabei die zulässige Translation. Die y-Achse zeigt orthogonal zur Greifachse und befindet sich in der gleichen horizontalen Ebene wie die x-Achse. Die z-Achse steht orthogonal auf den beiden anderen Achsen und zeigt in vertikaler Richtung weg vom Greifer (A_Klüpfel, 2021, S. 34).

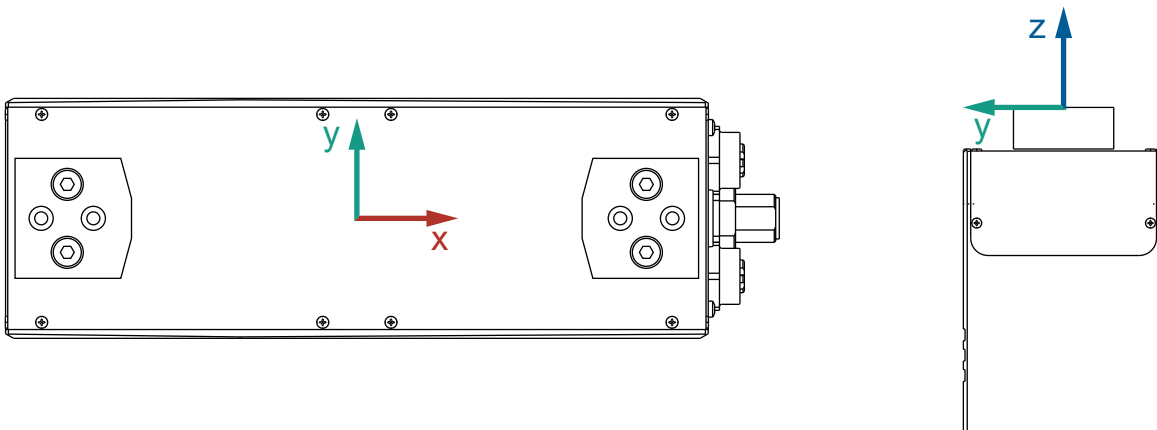


Abbildung 6-6: Greiferkoordinatensystem \tilde{G} mit dem Ursprung auf der Anschluss-ebene der Greiferfinger und der Orientierung der x-Achse in Greifrichtung

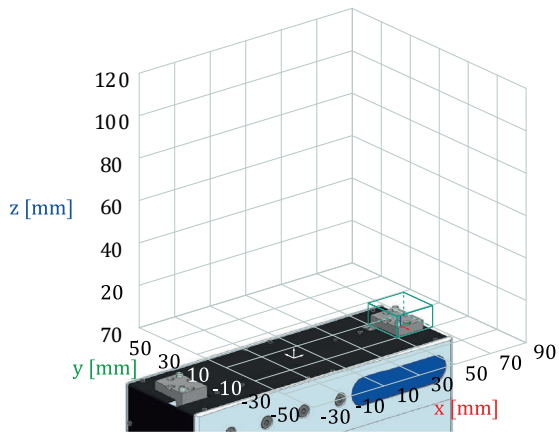
Bei dieser kinematischen Kette wird das nächste Modul immer auf die Ausgangsschnittstelle des vorherigen Moduls gesetzt. Die Orientierung eines Moduls ergibt sich aus der Multiplikation der Rotationsmatrizen der vorherigen Module. Damit ergibt sich für ein Modul an der Stelle k der Kette folgende Rotationsmatrix (A_Klüpfel, 2021, S. 36):

$$R_k = \prod_{i=0}^{k-1} R_i \quad 6-5$$

Das Modul an der Stelle k der Kette hat eine Montageposition $t_{k,\tilde{G}}$ in Greiferkoordinaten, die sich rekursiv aus der bestehenden kinematischen Kette gemäß Formel 6-6 ergibt (A_Klüpfel, 2021, S. 36):

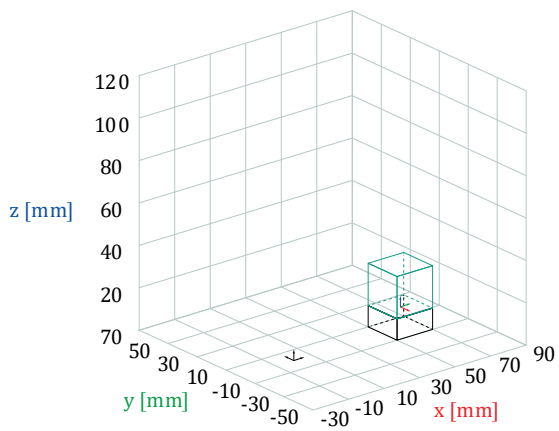
$$t_{k,\tilde{G}} = R_{k-1} \cdot \vec{p}_{k-1,\tilde{A}} + t_{k-1,\tilde{G}} \quad 6-6$$

Abbildung 6-7 zeigt den schrittweisen Aufbau eines Greiferfingers, wobei die Module als Quader abstrahiert sind. Das türkis markierte Modul bildet in jedem Schritt das Ende der kinematischen Kette mit dem farbigen Eingangskordinatensystem \tilde{A} . Das Greiferkoordinatensystem \tilde{G} ist schwarz (bzw. weiß) dargestellt.



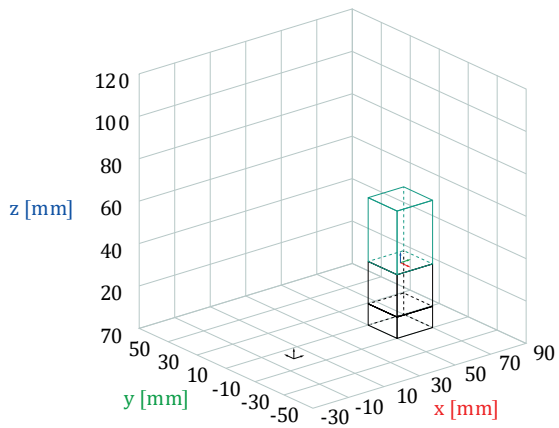
$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_{1,\tilde{G}} = \begin{pmatrix} 60 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



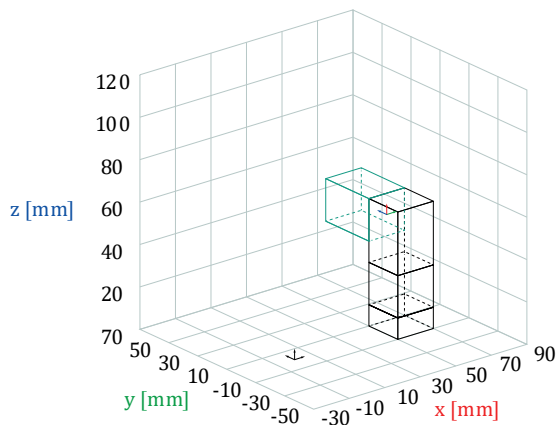
$$R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_{2,\tilde{G}} = \begin{pmatrix} 60 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix}$$



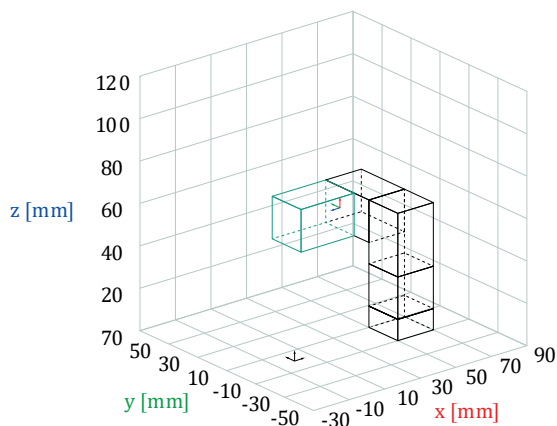
$$R_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_{3,\tilde{G}} = \begin{pmatrix} 60 \\ 0 \\ 30 \end{pmatrix}$$



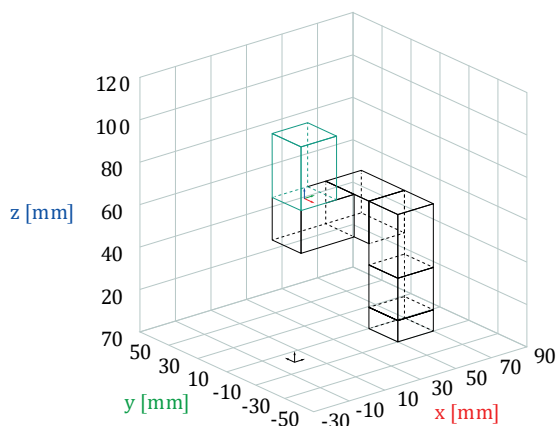
$$R_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_{4,\tilde{G}} = \begin{pmatrix} 60 \\ 10 \\ 50 \end{pmatrix}$$



$$R_5 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_{5,\tilde{G}} = \begin{pmatrix} 50 \\ 30 \\ 50 \end{pmatrix}$$



$$R_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_{6,\tilde{G}} = \begin{pmatrix} 30 \\ 30 \\ 60 \end{pmatrix}$$

Abbildung 6-7: Aufbau der kinematischen Kette mit Beispielmodulen

6.3.3 Nebenbedingungen

Da die Aneinanderreihung von Modulen noch keine gültige Greiferfingerkonfiguration ergibt, müssen Kriterien definiert werden, nach denen eine Konfiguration als gültig

eingestuft werden kann. Es kann dabei zwischen handhabungsobjektabhängigen und -unabhängigen Nebenbedingungen unterschieden werden.

6.3.3.1 Nebenbedingungen unabhängig vom Handhabungsobjekt

6.3.3.1.1 Fingerlänge und -gewicht

Eine Greiferfingerkonfiguration gilt dann als gültig, wenn mit der Konfiguration die Vorgaben des Greiferherstellers hinsichtlich der zulässigen Länge und des Gewichts der Greiferfinger nicht verletzt werden.

Bei der Handhabung von Objekten tritt durch die dafür notwendigen Greifkräfte in Kombination mit den Gewichtskräften und Trägheitsmomenten ein Kippmoment auf, das auf die Grundbacken des Greifers wirkt. Mit zunehmender Fingerlänge und/oder zunehmender Auskrägung der Finger nimmt dieses Moment zu. Die Greiferhersteller begrenzen daher die Fingerlänge und -auskrägung, um die Lebensdauer der Komponenten zu erhöhen. Dazu geben die Hersteller in der Regel zweidimensionale Diagramme heraus, in denen auf der y-Achse die Fingerlänge Z und auf der x-Achse die Auskrägung Y aufgetragen ist (s. Abbildung 6-8). Z beschreibt das senkrechte Maß und Y das horizontale Maß zwischen dem Greiferfingerfuß und dem mittleren Kontaktpunkt. Die Grenzkurven ergeben sich als Polynom zweiter Ordnung (siehe Formeln 6-7 und 6-8) (A_Klüpfel, 2021, S. 40).

$$Y \stackrel{!}{\leq} -\left(\frac{a}{b^2}\right) \cdot Z^2 + a \quad 6-7$$

$$Z = f(y) \stackrel{!}{\leq} \sqrt{1 - \frac{Y}{a}} \cdot b \quad 6-8$$

mit dem Schnittpunkt mit der x-Achse a und dem Schnittpunkt mit der y-Achse b .

Unter der Grenzkurve liegen alle gültigen Greiferfingerkonfigurationen für den jeweiligen Greifer. Die zulässige seitliche Auskrägung Y gilt auch für Auskrägungen in Greifrichtung X .

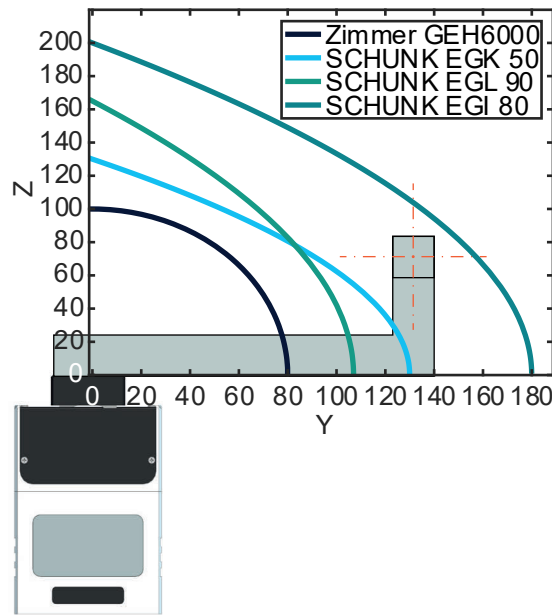


Abbildung 6-8: Zulässige Kombinationen aus Auskrägung und Fingerlänge

Die Hersteller weisen für die Greifermodelle maximal zulässige Fingergewichte aus. Da die Gestalt der Module zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt ist, kann das Greiferfingergewicht erst bei der Anwendung der Methode berücksichtigt werden.

6.3.3.1.2 Kollisionsräume

Greiferfingerkonfigurationen sind ungültig, wenn Kollisionen der Finger mit sich selbst, untereinander oder zwischen den Fingern und dem Greifer auftreten.

Um diese Kollisionsräume zu beschreiben, werden die Greiferfinger als Volumenkörper mit quaderförmiger Gestalt abstrahiert und beschrieben. Abbildung 6-9 zeigt die Hüllkurve H für ein beispielhaftes Modul an der Stelle k der kinematischen Kette, die mit dem folgenden Zahlentupel beschrieben wird (A_Klüpfel, 2021, S. 38).

$$H_k = (x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}, z_{min}, z_{max}) \quad 6-9$$

Eine Kollision tritt dann auf, wenn ein Massenpunkt P_i sich innerhalb von H_k befindet. Mathematisch beschreibt die Formel 6-10 diesen Zusammenhang:

$$P_i \in H_k \Leftrightarrow x_{min} < x_i < x_{max} \cap y_{min} < y_i < y_{max} \cap z_{min} < z_i < z_{max} \quad 6-10$$

mit $H_k = (x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}, z_{min}, z_{max})$ und $P_i = (x_i, y_i, z_i)$

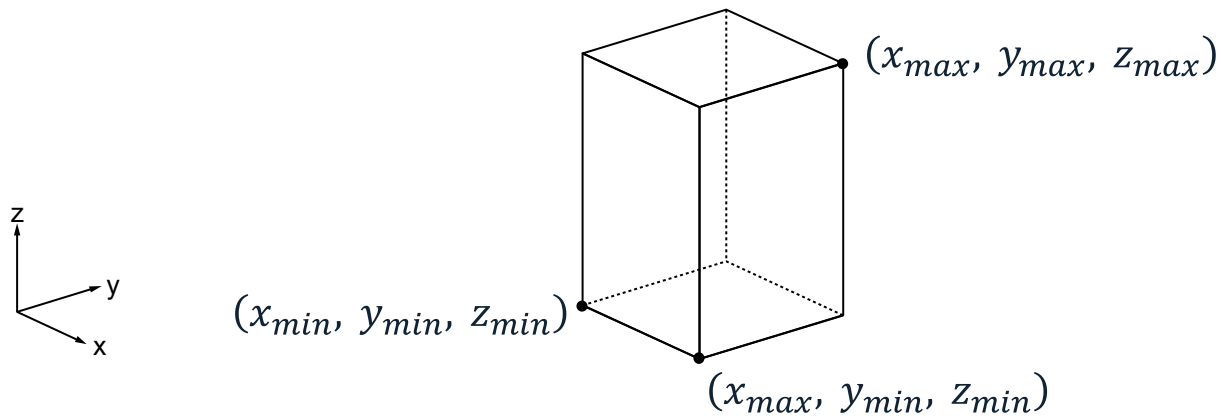


Abbildung 6-9: Hüllkurve H für ein Modul, die mithilfe der Eckpunkte beschrieben wird

Wird der Greifer ebenfalls vereinfacht als Quader gemäß Formel 6-9 mit der Hüllkurve H beschrieben, kann mit Formel 6-10 auf eine Kollision zwischen Greifer und Fingermodul geprüft werden.

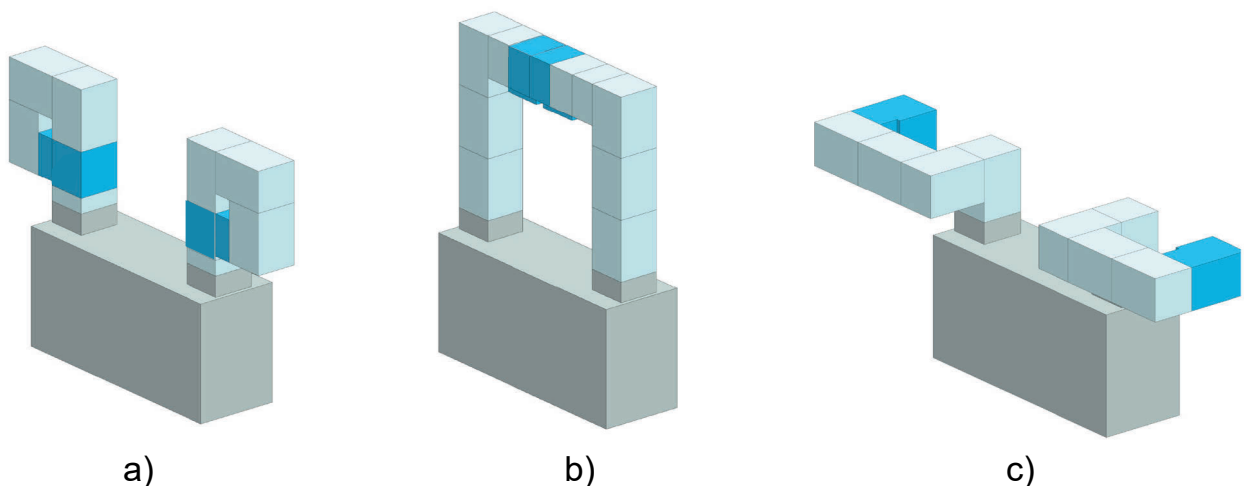


Abbildung 6-10: Mögliche Kollisionen der Finger untereinander (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 39))

Während eine Kollision der Finger mit dem Greifer einfach nachvollziehbar ist, existieren mehrere Kollisionsmöglichkeiten der Finger untereinander.

Durch eine ungünstige Anordnung der Module können die Finger mit sich selbst kollidieren (s. Abbildung 6-10a). Überschreiten die am geöffneten Greifer montierten Greiferfinger die yz -Ebene des Greiferkoordinatensystems, so kollidieren die beiden Finger miteinander aufgrund der festgelegten Symmetrie der Finger (Abbildung 6-10b). Die Finger kollidieren auch dann, wenn auf der Achse in x -Richtung, die die beiden Wirkflächen der Finger verbindet, sich weitere Fingerelemente befinden (Abbildung 6-10c).

6.3.3.1.3 Position und Orientierung der Fingerspitze

Je nach Ausgestaltung der Modulschnittstelle sowie der freien Anordnung der Module zueinander, können Konfigurationen entstehen, in denen die Ebenen der Wirkflächen der Finger nicht senkrecht zur Greifachse liegen. Die Gültigkeit einer Konfiguration wird deshalb über den Normalenvektor der Wirkfläche definiert. Aufgrund der Beschränkung auf Außengriffe muss der Normalenvektor des rechten Greiferfingers $\vec{n} = (-1 \ 0 \ 0)$ lauten. Darüber hinaus wird festgelegt, dass die z -Koordinate der Fingermodule stets positiv ($z_{min} > 0$) sein muss, und die Montagerichtung des letzten Fingermoduls nicht in negative z -Richtung zeigen darf (siehe Abbildung 6-11).

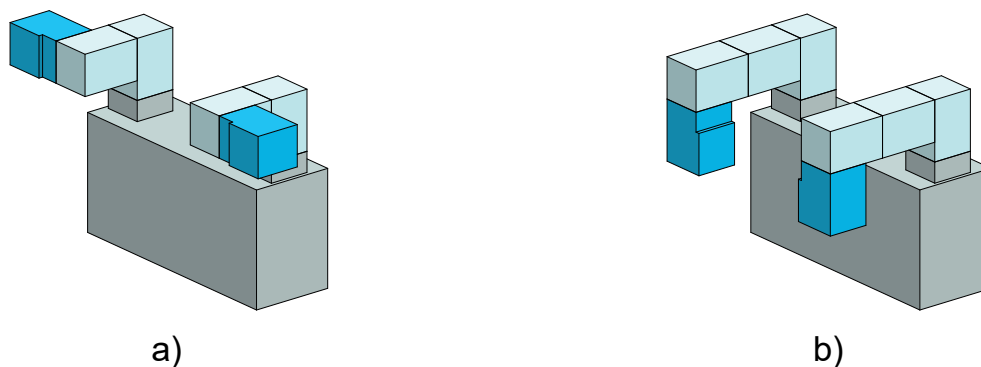


Abbildung 6-11: Restriktionen bei der Orientierung der Fingerspitze (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 42))

6.3.3.2 Nebenbedingungen abhängig vom Handhabungsobjekt

Die Greifpositionsbestimmung ermittelt, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, Greifpositionen in Bezug auf das Objektkoordinatensystem. Das Objektkoordinatensystem wird bei der Konstruktion vom Konstrukteur festgelegt, sodass sich der Bezug zwischen verschiedenen Handhabungsobjekten stark unterscheiden kann. Das Bezugskoordinatensystem hat somit keinerlei Bezug zur Greifaufgabe oder dem Greiferkoordinatensystem. Zudem besteht kein Bezug zum Schwerpunkt des Handhabungsobjekts (A_Klüpfel, 2021, S. 43). Es muss daher eine Transformationsvorschrift definiert werden, die das Objektkoordinatensystem in das Greiferkoordinatensystem überführt. Dafür werden die folgenden beiden Annahmen formuliert (A_Klüpfel, 2021, S. 43):

1. Für einen gültigen Griff zeigen die Normalenvektoren der Greifpositionen am Handhabungsobjekt in Richtung der Greifachse

2. Die Greifpunkte der Greifpositionen müssen die Wirkfläche am Greiferfinger im Zentrum berühren, um die Griffstabilität zu maximieren

Annahme eins führt dazu, dass ein Handhabungsobjekt um den Winkel θ um eine Rotationsachse, die durch den Einheitsvektor \vec{k} beschrieben wird, in seine Zielposition gedreht werden muss. Für die Rotationsachse mit dem Einheitsvektor \vec{k} , den Rotationswinkel θ und die Rotationsmatrix R gelten die folgenden Formeln:

$$\vec{k} = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a} \times \vec{b}|} \quad 6-11$$

mit dem Startvektor \vec{a} und dem Zielvektor \vec{b}

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \right) \quad 6-12$$

Die Rotationsmatrix R wird aus Eulerparametern θ_x aufgebaut.

$$\theta_0 = \cos \frac{\theta}{2} \quad \theta_1 = k_1 \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad \theta_2 = k_2 \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad \theta_3 = k_3 \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad 6-13$$

Mit k_1 , k_2 und k_3 als Bestandteile des Einheitsvektors \vec{k} der Rotationsachse.

$$R = 2 \cdot \begin{bmatrix} \theta_0^2 + \theta_1^2 - \frac{1}{2} & \theta_1\theta_2 - \theta_0\theta_3 & \theta_1\theta_3 + \theta_0\theta_2 \\ \theta_1\theta_2 + \theta_0\theta_3 & \theta_0^2 + \theta_2^2 - \frac{1}{2} & \theta_2\theta_3 - \theta_0\theta_1 \\ \theta_1\theta_3 - \theta_0\theta_2 & \theta_2\theta_3 + \theta_0\theta_1 & \theta_0^2 + \theta_3^2 - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad 6-14$$

Die zweite Annahme führt zu einer Translation des Handhabungsobjektes, sodass die Mitte der Verbindungslinie zwischen den beiden Greifpositionen im Ursprung des Greiferkoordinatensystems liegt (Translation in x-Richtung). Abhängig von der Fingergeometrie muss das Handhabungsobjekt in z-Richtung soweit verschoben werden, dass die Verbindungslinie auf der Höhe der beiden Mittelpunkte der Greiferfingerwirkflächen liegt (A_Klüpfel, 2021, S. 43–44). Damit ist die Lage des Handhabungsobjektes in allen Raumrichtungen und die Orientierung in Bezug auf die y- und z-Achse eindeutig definiert. Eine Rotation um die Greifachse hingegen ist weiterhin möglich und bestimmt maßgeblich die Störkontur des Handhabungsobjektes. Um den verbleibenden Freiheitsgrad einzuschränken, wird die Vorzugsorientierung der Handhabungsobjekte

verwendet. Die Vorzugsorientierung eines Handhabungsobjektes ist nach Hesse (2020) durch den maximalen Kippwinkel definiert. In dieser Orientierung ist auch die Ordnungswahrscheinlichkeit für diesen Zustand maximal, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass ein Handhabungsobjekt in seiner Vorzugsorientierung bereitgestellt wird.

Um nicht rotationssymmetrische Objekte hinsichtlich ihrer Vorzugsorientierung auszurichten, werden die STL-Dateien der Handhabungsobjekte untersucht. Verwendet werden die Eckpunkte der Oberflächen in der STL-Datei deren Normalenvektor orthogonal zur Greifachse ist.

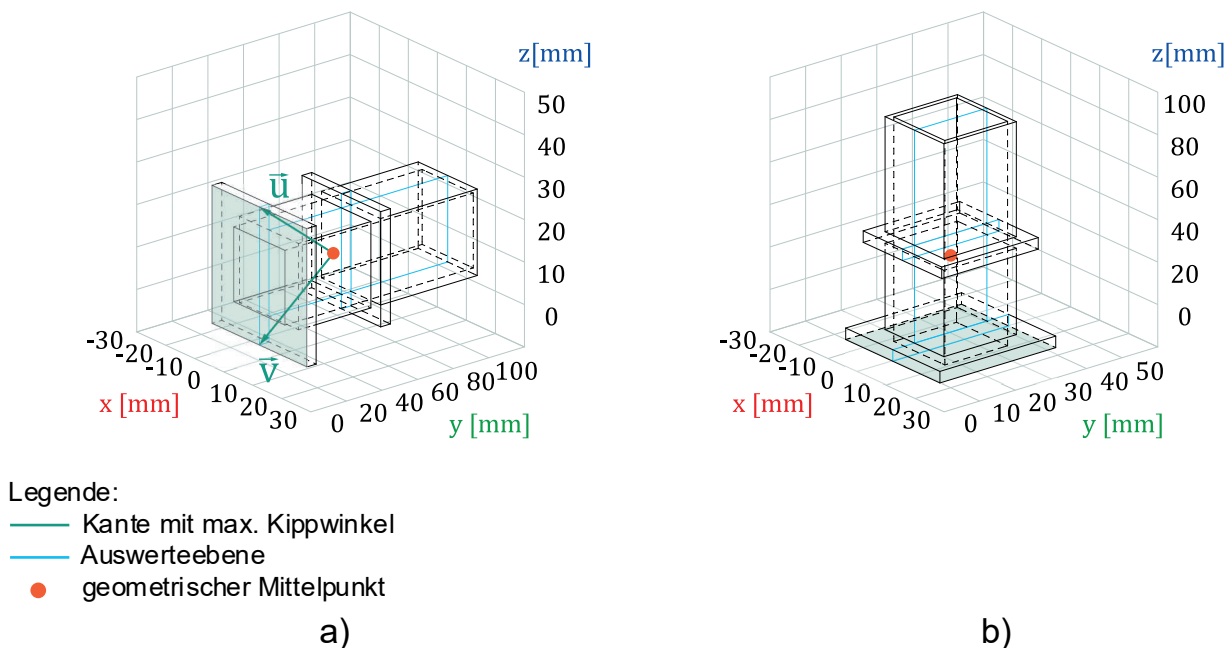


Abbildung 6-12: Ermittlung der Vorzugsorientierung und Neuorientierung eines Objekts (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 46))

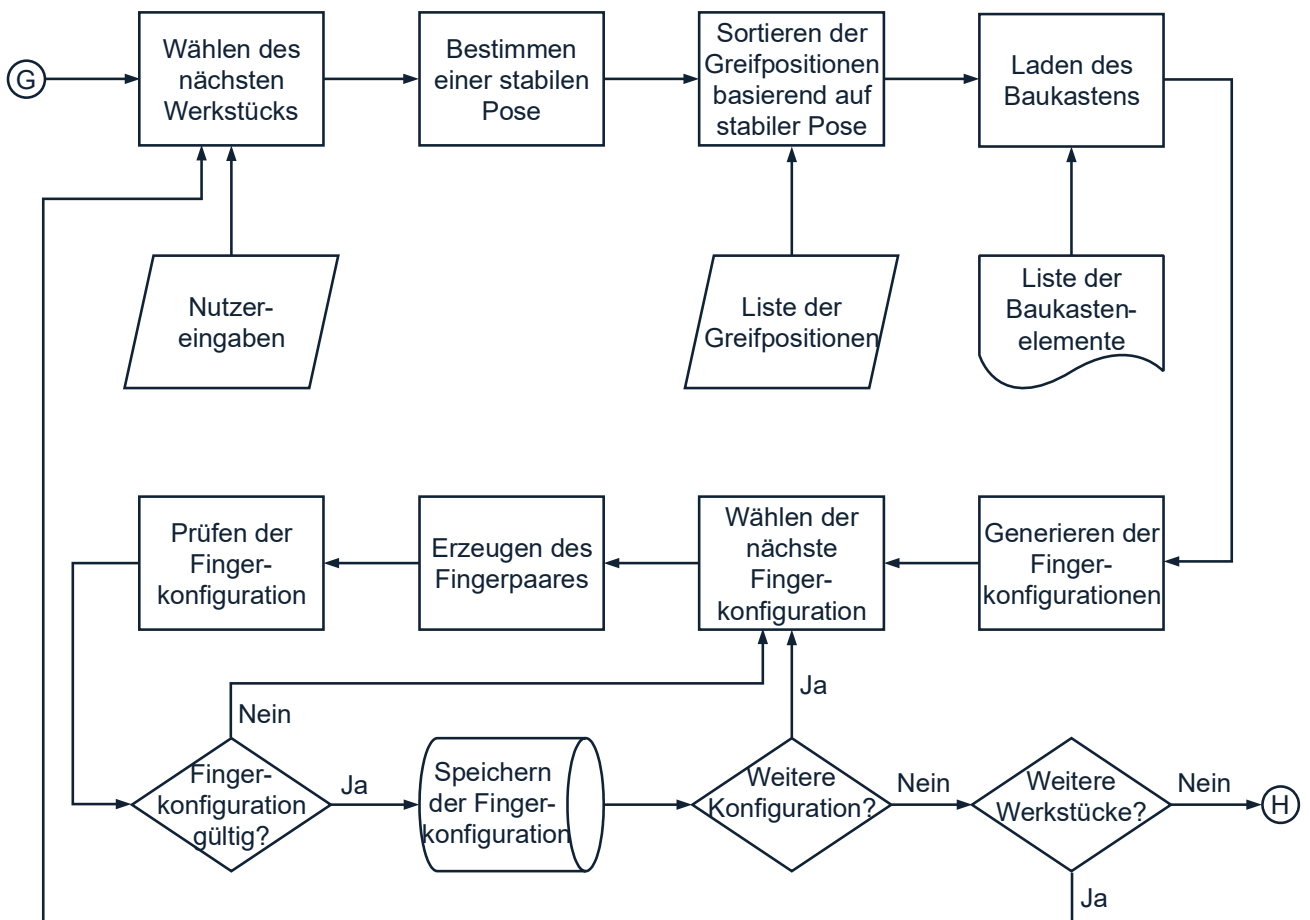
Gemäß dem Greiferkoordinatensystem \tilde{G} entspricht die Auflagefläche eines Handhabungsobjektes der xy -Ebene. Demnach muss der Kippwinkel zweidimensional bzgl. der yz -Ebene untersucht werden (Abbildung 6-12a). Dazu werden die Eckpunkte der Dreiecksflächen der STL-Dateien jeweils einer Auflagefläche zugeordnet, wobei nur die Flächen berücksichtigt werden deren Normalenvektor orthogonal auf der Greifachse stehen. Zusätzlich wird die Auswerteebene des Objekts über die Orthogonalität der Greifachse zu dieser Fläche und dem Schwerpunkt als Stützvektor definiert. Die Größe einer Fläche wird durch die äußersten Eckpunkte von Dreiecken definiert und durch Parallelprojektion auf die Auswerteebene abgebildet (Abbildung 6-12b) (A_Klüpfel, 2021, S. 45–46).

Durch die Transformation des Handhabungsobjekts ergibt sich ein Abstand zwischen den Greifpunkten in Greifrichtung. Der Abstand zwischen den Wirkflächen konfigurierter Finger abzüglich einer Toleranz von 5 mm bestimmt die **zulässige Objektbreite**. Alle Konfigurationen deren zulässige Objektbreite geringer ist als der Abstand zwischen den Greifpositionen am Handhabungsobjekt werden aussortiert.

Darüber hinaus müssen die Greifpositionen von den Fingerpaaren **ohne Kollision** erreicht werden können. Dafür müssen mögliche Kollisionen zwischen Handhabungsobjekt und Greiferfinger für jede Position der Greiferfinger beim Schließen überprüft werden. Die zuvor beschriebene Kollisionserkennung als auch die von (Honarpardaz, Ölvander & Tarkian, 2019) ist hierfür aus den folgenden Gründen ungeeignet. (Honarpardaz, Ölvander & Tarkian, 2019) prüfen die zuvor aufwendig ermittelten Greiferfingergeometrien auf mögliche Kollisionen einmalig am Ende und nutzen dafür eine in der Software CATIA V5 integrierte Kollisionserkennung. Die Qualität der Kollisionserkennung basierend auf den Hüllkurven der Fingermodule ist stark abhängig von der Qualität und der Dichteverteilung der STL-Datei. Eine hohe Auflösung der STL-Datei und damit eine verbesserte Kollisionserkennung hat negative Auswirkungen auf die Rechenzeit. Daher werden hier hierarchische, objektorientierte Hüll-Quader (OBBTrees) eingesetzt. Die Körper werden ebenfalls approximiert, jedoch erfolgt die Detaillierung bei der Approximation in Abhängigkeit des Abstands. Bezogen auf die Handhabung bedeutet dies, dass die Fingermodule bei Beginn des Schließvorganges zunächst sehr grob approximiert werden müssen und damit die Anzahl an Schnitttest reduziert werden können. So kann der gesamte Schließvorgang schnell auf Kollisionen geprüft werden. Dieser ist kollisionsfrei, wenn eine Kollision erst nach Erreichen des Greifpunktes erkannt wird (A_Klüpfel, 2021, S. 47–49).

6.3.4 Ablauf der Konfiguration für ein Handhabungsobjekt

Die folgende Abbildung 6-13 zeigt den Ablauf der Konfiguration für ein Handhabungsobjekt. Werden vom Anwender die Konfigurationen für mehrere Handhabungsobjekte benötigt, so werden diese sequentiell ermittelt. Nach Abschluss der Konfiguration liegt für jedes Handhabungsobjekt eine Liste an gültigen Fingerkonfigurationen vor.



Legende:



Abbildung 6-13: Ablauf der Konfiguration für jeweils ein Handhabungsobjekt (eigene und veränderte Darstellung nach (Friedmann et al., 2023, S. 9))

7 Bewertung

Die Fingerkonfigurationen, die alle zuvor beschriebenen Nebenbedingungen erfüllen, sind prinzipiell für die Handhabungsaufgabe des Anwenders geeignet. Jedoch erfüllen nicht alle zulässigen Konfigurationen die Handhabungsaufgabe mit der gleichen Qualität. Unter der Bedingung, dass alle vom Anwender definierten Handhabungsobjekte gegriffen werden können, ist das Ziel, die Fingerkonfiguration mit der höchsten Greiferfingerqualität auszuwählen, bei mehreren Handhabungsobjekten soll darüber hinaus der Rekonfigurationsaufwand minimiert werden. Die verbleibenden Konfigurationen müssen daher miteinander verglichen werden können. Hierfür sind Kriterien zu definieren, die im Folgenden beschrieben werden. Die Kriterien müssen dabei einerseits die Qualität der Finger bewerten und andererseits bei einer Handhabungsobjektreihenfolge einen Kompromiss zwischen einer Minimierung des Rekonfigurationsaufwandes und einer Maximierung der Fingerqualität finden. Abbildung 7-1 zeigt den Ablauf der Bewertung.

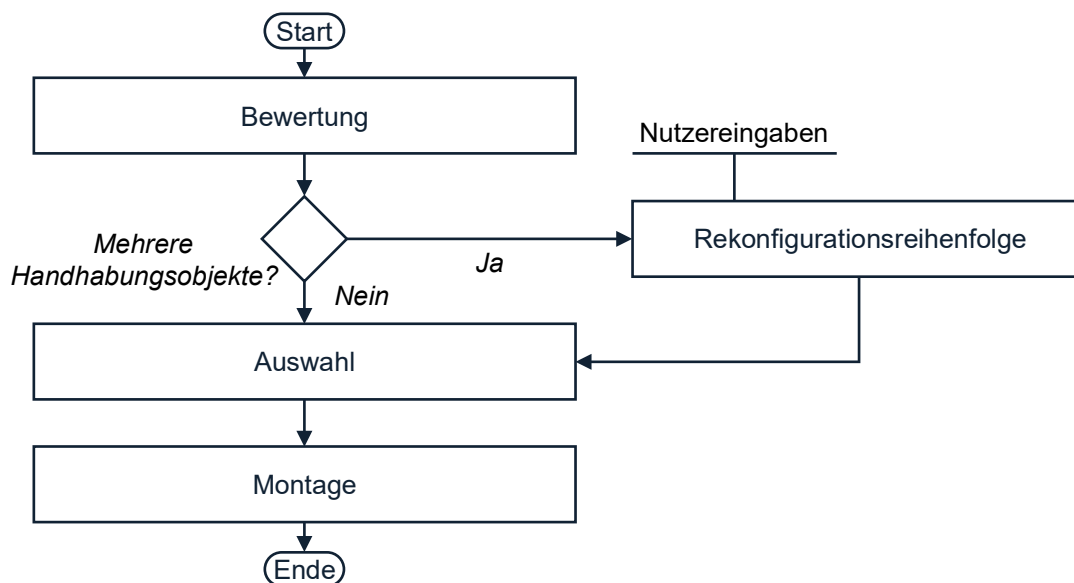


Abbildung 7-1: Ablauf der Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen

7.1 Bewertung der Fingerqualität

Die Qualität von Greiferfingerkonfigurationen wird anhand von fünf unabhängigen Kriterien bewertet.

7.1.1 Fingerlänge

Wie bereits in den Anforderungen an den Greiferfingerbaukasten formuliert, sollte die Greiferfingerlänge möglichst gering sein. In der Literatur wird dies damit begründet, dass durch die große Distanz zwischen dem Punkt der Krafteinleitung in den Fingern und der Stelle, an der der Finger das Handhabungsobjekt berührt, große Biegemomente auf den Greiferfingerfuß wirken. Ein Flächenkontakt wird dabei verstärkt zu einem Linienkontakt, und die Greifsicherheit nimmt ab. Während bei zu kurzen Fingern das Handhabungsobjekt mit dem Greifer kollidieren kann, vergrößert sich der Hebelarm bei zunehmender Fingerlänge, was dazu führt, dass die Wirkflächen nicht mehr richtig auf das Handhabungsobjekt ausgerichtet sind. Mit der steigenden Momentenbelastung geht auch ein höherer Verschleiß der an der Fingerbewegung beteiligten Komponenten sowie ein schlechteres Regelverhalten einher (A_Klüpfel, 2021, S. 54–55).

7.1.2 Auskrägung

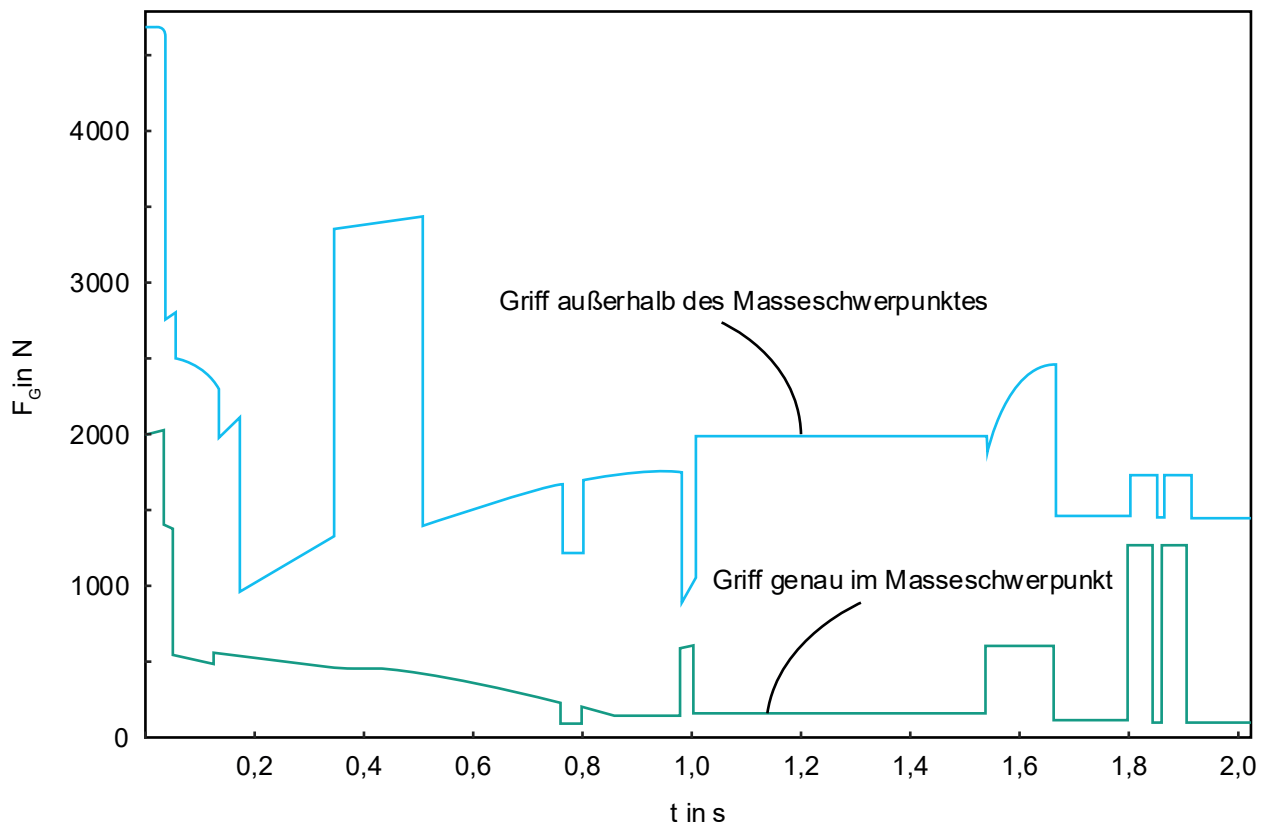


Abbildung 7-2: Erforderliche Greifkraft während eines Handhabungszyklus (eigene Darstellung nach (Hesse, 2011, S. 40))

Während die eben beschriebene Fingerlänge das Biegemoment um die y-Achse berücksichtigt, wirkt bei Fingern mit einer seitlichen Auskrugung ein weiteres Biegemoment um die z-Achse. Dies verstärkt die oben genannten negativen Auswirkungen. Durch exzentrische Lastfälle werden die Finger „aufgehebelt“ und der Kontakt zwischen Wirkfläche und Handhabungsobjekt nimmt ab, was durch eine erhöhte Greifkraft kompensiert werden kann. Abbildung 7-2 zeigt den Vergleich der Greifkräfte bei exzentrischem und zentrischem Griff. Für typische Lastfälle fällt das auftretende Kippmoment in den Bereich der Dauerfestigkeit und wirkt sich damit nicht negativ auf die Handhabung aus. Um aber auch bei außergewöhnlichen Lastfällen eine robuste Handhabung zu ermöglichen, sind Fingerkonfigurationen ohne oder nur mit geringer Auskrugung zu bevorzugen (A_Klüpfel, 2021, S. 59–60).

7.1.3 Flexibilität

Allgemein ist die Flexibilität eines Greifers über die Anzahl an Aufgaben definiert, die ohne hardwareseitige Anpassung durchgeführt werden können (siehe 2.2.3). Heruntergebrochen auf eine Fingerkonfiguration ist diese umso flexibler, je mehr Handhabungsaufgaben ohne Neukonfiguration durchgeführt werden können. Lange Finger bieten gewisse Vorteile, da mit größerer Länge mehr Greifpositionen erreicht werden können, jedoch bringen diese auch die unter 7.1.1 beschriebenen Nachteile mit sich. Daher muss bei der Bewertung ein Abwägen zwischen der Fingerlänge und der erreichbaren Flexibilität erfolgen (A_Klüpfel, 2021, S. 60).

7.1.4 Modulanzahl

Durch die serielle Verkettung der Module in einer Fingerkonfiguration werden kleinste Abweichungen in den Genauigkeiten der einzelnen Module aufaddiert. Mit steigender Anzahl pro Konfiguration steigen auch die Maßabweichungen und dies führt zu einer Positionsverschiebung der Wirkfläche des Greiferfingers. Um die Produktionskosten nicht durch höhere Toleranzanforderungen an die Einzelmodule zu erhöhen und die Montageaufwände beim Zusammenbau der Finger zu reduzieren, sind bei der Bewertung Fingerkonfigurationen mit niedrigen Modulzahlen zu bevorzugen (A_Klüpfel, 2021, S. 59).

7.1.5 Taktzeit

Während sich die Modulanzahl einer Konfiguration auf die Verfügbarkeit des Handhabungssystems und die Fingerlänge und Auskrugung auf die Qualitätsrate auswirken,

zählt zur Gesamtanlageneffektivität auch der Leistungsgrad. Dieser wird in der Bewertung in Form der Taktzeit berücksichtigt: Die Zeit zum Herstellen eines gültigen Griffes am Handhabungsobjekt steigt proportional mit dem Weg, den die Grundbacken bis zum Erreichen der Greifposition zurücklegen müssen. Es sind daher Konfigurationen zu bevorzugen, die den Backenhub minimieren und damit auch die Störkontur des Greifsystems reduzieren (A_Klüpfel, 2021, S. 60).

7.1.6 Bewertungsmetrik

Aus den Beschreibungen der Bewertungskriterien wird deutlich, dass die Optima von einigen Kriterien gegenläufig sind. Um zwischen den Kriterien zu vermitteln und bei der Bewertung den besten Kompromiss zu erreichen, wird eine Nutzwertanalyse eingeführt. Der Gewichtungsfaktor wird über einen paarweisen Vergleich ermittelt (Tabelle 7-1). Die Fingerlänge, die Flexibilität und die Auskrugung stellen die wichtigsten Kriterien dar. Durch die Möglichkeit der Vorpositionierung mechatronischer Greifer ist die zu erwartende Taktzeitoptimierung allein durch die Fingergestalt als gering einzustufen. Gleiches gilt für die Modulanzahl, die bei Einhaltung der maximal zulässigen Fingerlänge und Auskrugung nur von geringer Bedeutung ist (A_Klüpfel, 2021, S. 60–61).

Tabelle 7-1: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien

	Fingerlänge	Auskrugung	Flexibilität	Modulanzahl	Taktzeit	Σ	Gewichtungsfaktor
Fingerlänge		1	1	2	2	6	0,30
Auskrugung	1		1	2	2	6	0,30
Flexibilität	1	1		2	2	6	0,30
Modulanzahl	0	0	0		1	1	0,05
Taktzeit	0	0	0	1		1	0,05

Mit der Gewichtung ist eindeutig, wie und nach welchen Kriterien die Fingerkonfigurationen bewertet werden, jedoch noch nicht anhand welcher Größen beispielsweise die Taktzeit gemessen wird. Es wird der Erfüllungsgrad der Kriterien über folgende Charakteristika beschrieben:

Die Bewertung der **Fingerlänge** erfolgt anhand der Abweichung der Fingerlänge von der handhabungsobjektspezifischen, idealen Fingerlänge. Die Abweichung der Wirkfläche des Greiferfingers von der Greifachse in y-Richtung wird für die Bewertung der **Auskragung** herangezogen. Der prozentuale Anteil einer Menge an Handhabungsobjekten, die mit einer Konfiguration gegriffen werden kann, ergibt die Bewertung der **Flexibilität**. Die Bewertungszahl für die **Modulanzahl** ergibt sich entsprechend der Anzahl an Modulen in einer Konfiguration, und die **Taktzeit** wird entsprechendes des notwendigen Backenhubes einer Konfiguration bis zum Erreichen des Griffs bewertet. Der Erfüllungsgrad eines Kriteriums ergibt sich dann durch die Zuordnung zu einem Wertebereich. Der gesamte Wertebereich eines Kriteriums wird dazu linear in fünf Stufen eingeteilt. Der Nutzwert für eine Konfiguration ergibt sich damit zu:

$$\begin{aligned} \text{Nutzwert} = & 0,3 \cdot \text{Bewertung}_{\text{Fingerlänge}} + 0,3 \cdot \text{Bewertung}_{\text{Auskragung}} + 0,3 \\ & \cdot \text{Bewertung}_{\text{Flexibilität}} + 0,05 \cdot \text{Bewertung}_{\text{Modulanzahl}} + 0,05 \\ & \cdot \text{Bewertung}_{\text{Taktzeit}} \end{aligned} \quad 7-1$$

7.2 Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes

Anhand der Bewertungsmetrik kann jede ermittelte Konfiguration bewertet und so die Konfiguration mit dem höchsten Gesamtnutzen hinsichtlich der Fingerqualität für ein Handhabungsobjekt ermittelt werden. Je nach Handhabungsaufgabe kann/können für den Anwender aber auch die Konfiguration(en) am besten sein, die den geringsten Rekonfigurationsaufwand mit sich bringt. Dafür muss zunächst definiert werden, was unter einer Rekonfiguration verstanden wird und was diese umfasst. Darüber hinaus wird eine Größe benötigt, die den Rekonfigurationsaufwand von einer Konfiguration zu einer anderen beschreibt. Mit einer Optimierung kann dieser Aufwand dann, unter der Berücksichtigung von Nebenbedingungen, reduziert werden.

7.2.1 Konfiguration für eine Folge von Handhabungsobjekten

Der Rekonfigurationsvorgang beschreibt das Umbauen von einer Fingerkonfiguration in eine andere. Eine Konfiguration besteht dabei aus einer seriellen Aneinanderreihung von Modulen des Baukastens. Unter der Annahme, dass ein Greiferfingerbaukasten aus den Modultypen A, B, C, D, E, F, G besteht, zeigt Abbildung 7-3 zwei Beispielkonfigurationen an Fingern. Die Konfiguration auf der linken Seite soll in die Konfiguration auf der rechten Seite umgebaut werden.

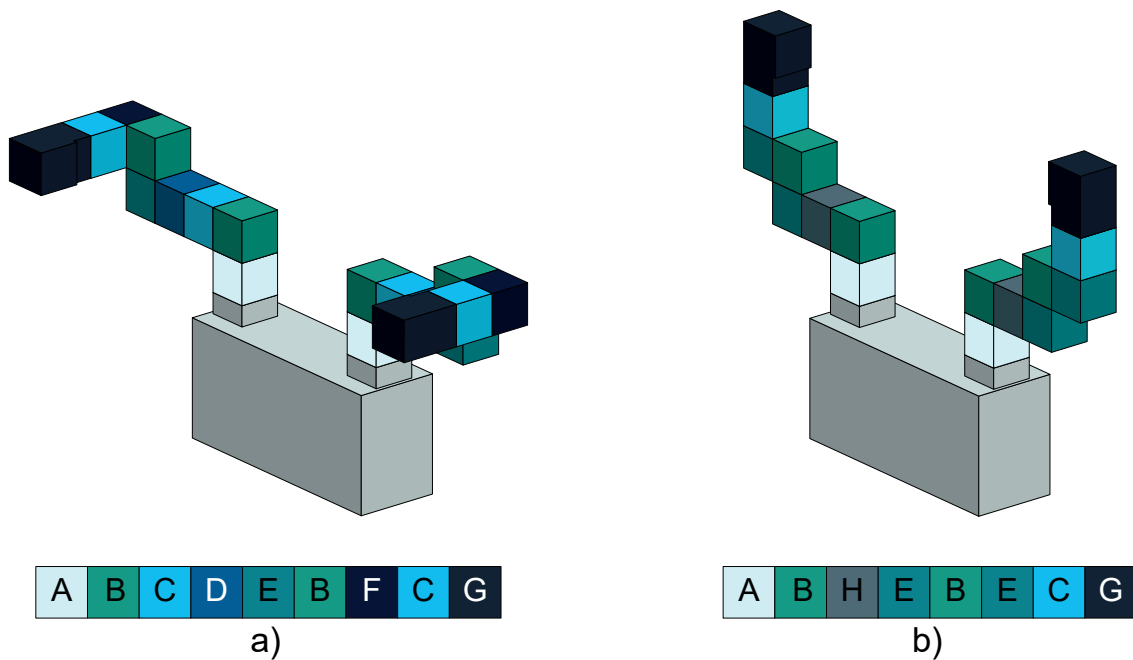


Abbildung 7-3: Beispiel für die Rekonfiguration von einer Startkonfiguration in eine Zielkonfiguration

Um den Rekonfigurationsaufwand zu reduzieren, sollen zwischen den Konfigurationen übereinstimmende Modulsequenzen erhalten bleiben. Ein Vergleich der beiden Konfigurationen zeigt, dass es drei übereinstimmende Modulsequenzen gibt, die zu einzelnen Modulen zusammengefasst werden (siehe Abbildung 7-4 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

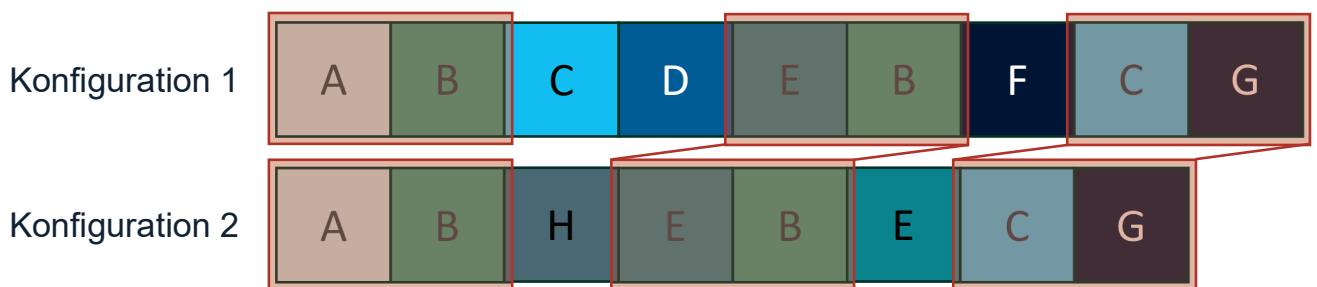


Abbildung 7-4: Übereinstimmende Modulsequenzen zwischen zwei Greiferfingerkonfigurationen (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 44))

Die Rekonfiguration beginnt mit dem Öffnen der Kette immer nach dem ersten Modul der Ausgangskonfiguration. Im betrachteten Beispiel erfolgt dies nach dem Modul X. Anschließend müssen die Module aus der Konfiguration demontiert werden, die für die zweite Konfiguration nicht benötigt werden. Besteht eine Konfiguration aus k Modulen, so muss die Demontage $k - 2$ Mal durchgeführt werden. Im Beispiel ist $k = 6$ und es müssen vier Module demontiert werden. Nach der Demontage erfolgt die Montage der Module der zweiten Konfiguration auf dem ersten Modul der Ausgangskonfiguration.

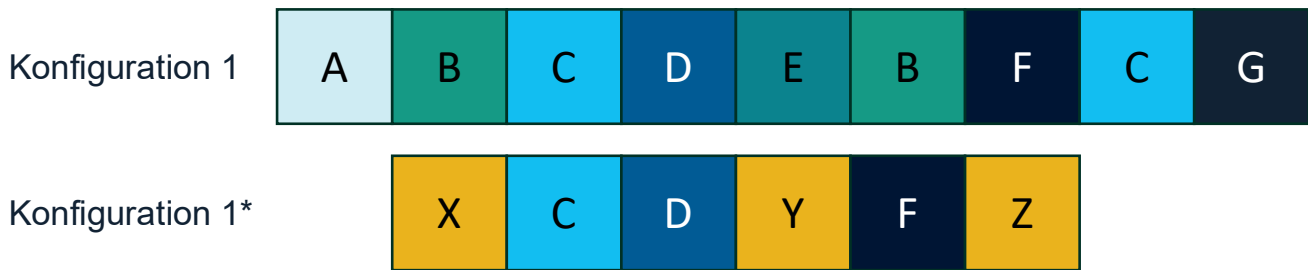


Abbildung 7-5: Zusammenfassung von gleichbleibenden Modulsequenzen in eigenständige Module (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 44))

Besteht die neue Konfiguration aus k Modulen, so muss die Montage von Modulen $k - 2$ Mal durchgeführt werden. Im Beispiel ist $k = 5$ und es müssen drei Module montiert werden. Abschließend erfolgt das Schließen der kinematischen Kette mit der Montage des letzten Moduls am Ende der Kette (Abbildung 7-6) (A_Frech, 2023, S. 38).

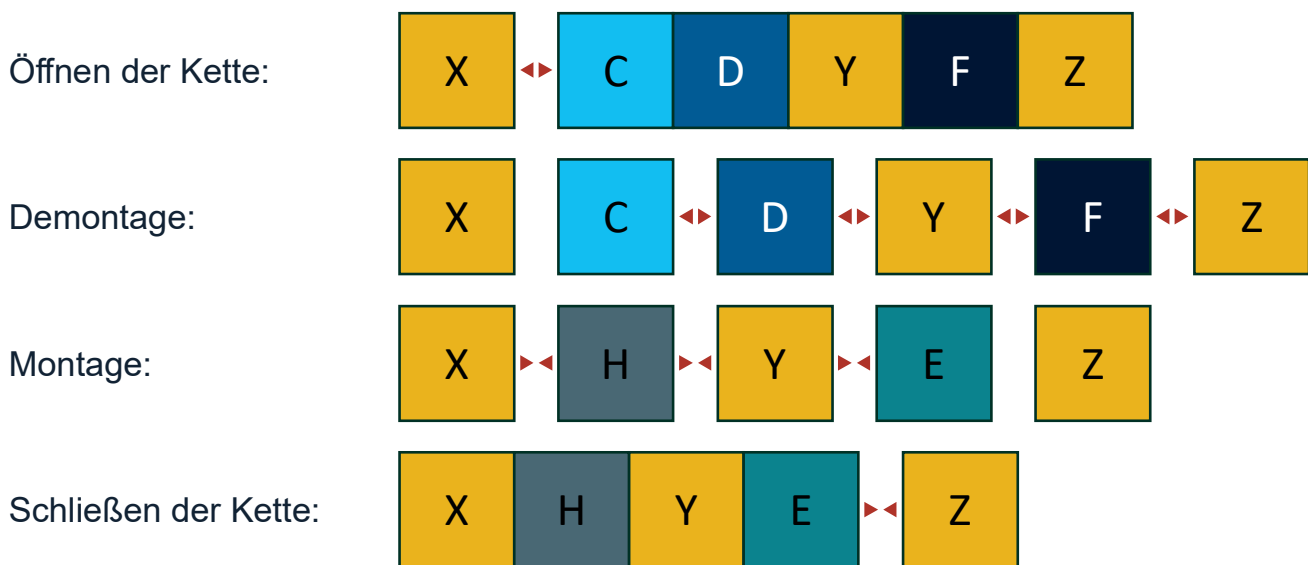


Abbildung 7-6: Vier Teilschritte einer Rekonfiguration (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 44–45))

Zusammengefasst gilt: Besteht die Startkonfiguration aus k_{SZS}^{14} und die Endkonfiguration aus k_{SZE}^{15} sequenziell zusammengefassten Modulen, so müssen für eine Rekonfiguration die in Tabelle 7-2 genannten Operationen durchgeführt werden:

¹⁴ SZS steht für sequenziell zusammengefasste Startkonfiguration

¹⁵ SZE steht für sequenziell zusammengefasste Endkonfiguration

Tabelle 7-2: Anzahl durchzuführender Operationen bei einer Rekonfiguration

Operation	Öffnen der Kette	Demontage	Montage	Schließen der Kette
Anzahl	1	$k_{SZS} - 2$	$k_{SZE} - 2$	1

7.2.2 Rekonfigurationsaufwand

Ob der Anwender eine vorhandene Konfiguration in eine andere umbaut, ist letztlich ein Kompromiss zwischen dem Zugewinn an Griffqualität mit der neuen Konfiguration und dem Aufwand zur Rekonfiguration. Während die Griffqualität einer Konfiguration mit dem Bewertungsschema aus Kapitel 7.1 ermittelt werden kann, muss für den Rekonfigurationsaufwand eine solche Bewertungsmöglichkeit noch definiert werden. Der Rekonfigurationsaufwand ist die Leistung oder der Einsatz, der erbracht wird, um die Fingergestalt von einer Konfiguration in eine andere zu überführen. Der zu erbringende Einsatz entspricht weitestgehend der Zeit, die ein Anwender benötigt, um eine Konfiguration ganz oder teilweise zu demontieren sowie in geänderter Reihenfolge und mit anderen Modulen wieder zu montieren. Diese Zeit kann mit einer Arbeitsablauf-Zeitanalyse (engl. Methods-Time-Measurement-Analysis, auch MTM-Analyse genannt) ermittelt werden. Um Werte für Zeitaufwände der einzelnen Rekonfigurationsschritte zu identifizieren, wird ein Analyse-System für den zu untersuchenden Prozess vorgeschlagen. Die daran ermittelten Werte können dann als Grundlage für abgewandelte Prozesse verwendet werden.

Das Analysesystem besteht aus einem Handhabungssystem in einem eigenen Arbeitsbereich. Dieser grenzt an einen manuellen Arbeitsbereich an, in welchem der Bediener die Rekonfiguration vornehmen kann. Hierfür wird das Handhabungsgerät in eine Rekonfigurationsposition gebracht, in der die Greiferfinger in den Arbeitsbereich des Bedieners hineinragen. Dem Anwender stehen an festen Positionen die Module des Baukastens sowie an einer weiteren Position das Werkzeug zur Verfügung. Sobald das Handhabungsgerät die Rekonfigurationsposition erreicht hat, beginnt die Rekonfiguration und endet, sobald der Bediener das Werkzeug und falls vorhanden, die entfernten Module abgelegt hat. Der Gesamtablauf kann dann in die Grundschritte der MTM-1 (s. Kapitel 2.4) unterteilt werden. Die Kombinationen der Grundschritte sind maßgeblich abhängig von der Schnittstelle und ob für die Demontage und Montage ein Werkzeug benötigt wird. Für die Rekonfiguration der Greiferfinger können die vier Schrittketten „Öffnen der Kette“, „Montage eines Moduls“, „Demontage eines Moduls“ und

„Schließen der Kette“ festgelegt werden (A_Frech, 2023, S. 36–40). Tabelle 7-3 zeigt beispielhaft die Operation zum Öffnen der kinematischen Kette mit einem Werkzeug.

Tabelle 7-3: Basisbewegungen des Teilschritts „Öffnen der Kette“

Basisbewegung	Körperteil	Zu handhabendes Objekt	#
Hinlangen	rechte Hand	-	1
Greifen	rechte Hand	Werkzeug	2
Hinlangen	linke Hand	-	3
Greifen	linke Hand	Modulkette	4
Bringen	rechte Hand	Werkzeug	5
Fügen	rechte Hand	Werkzeug	6
Drehen	rechte Hand	Werkzeug	7
Trennen	linke Hand	Modulkette	8
Bringen	rechte Hand	Werkzeug	9
Bringen	linke Hand	Modulkette	9
Loslassen	linke Hand	Modulkette	10

Die doppelte Nennung einer Vorgangsnummer bedeutet das parallele Durchführen der Bewegungen. Die so erstellten Ablauf Tabellen können dann mittels der MTM-1 Datenkarte codiert und näher spezifiziert werden. Tabelle 7-4 zeigt die Codierung für die Schritte in Tabelle 7-3.

Tabelle 7-4: Beispielhafte Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Öffnen der Kette“

Basisbewegung	Distanz x [mm]	Distanz y [mm]	Distanz z [mm]	Gesamtdistanz [mm]	Codierung	#	Dauer [TMU]
Hinlangen	150	110	0	190	A	1	9,6
Greifen					G1C1	2	8,7
Hinlangen	310	80	400	510	A	3	13,1
Greifen					G1C1	4	7,3
Bringen	150	20	400	430	A	5	16,5
Fügen					P3	6	43,0
Drehen					T-M	7	8,5
Trennen					D_2	8	11,8
Bringen	320	90	400	520	A	9	8,1
Bringen			400	400	B	9	15,6
Loslassen					RL1	10	2,0

Mit der Codierung und zugehörigen Bewegungslänge können dann aus der Normzeitwertkarte Zeiten zur Durchführung der Basisbewegungen in Time Measurement Units (TMU) ermittelt werden. Eine TMU entspricht einer Zeit von 0,036s.

Damit können für die Zeiten und damit die Aufwände für die zuvor definierten vier Schrittketten ermittelt werden. Zur Bewertung dieser Aufwände wird noch das Bewertungsintervall sowie die Auflösung dieses Intervalls benötigt. Die untere Wertebereichsgrenze liegt bei Null im Falle, dass zwei Handhabungsobjekte mit der gleichen Konfiguration gegriffen werden können und so keine Rekonfiguration notwendig ist. Der maximale Rekonfigurationsaufwand entsteht, wenn jedes Modul einer Konfiguration, bestehend aus der Maximalanzahl an Modulen pro Finger, ausgetauscht werden muss. Dies ist abhängig vom Baukastenumfang und den einzelnen Modulen und muss für einen Baukasten ermittelt werden (A_Frech, 2023, S. 49–52).

Um einen kombinierten Nutzwert aus Fingerqualität und Rekonfigurationsaufwand zu ermitteln, muss die Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes auf demselben Prinzip basieren. Da zur Bewertung der Fingerqualität fünf Kriterien verwendet werden, ist eine feingliedrige Unterteilung der Nutzwerte einer Fingerkonfiguration möglich. Der Rekonfigurationsaufwand als einziges Kriterium zur Bewertung der Rekonfiguration muss daher feiner untergliedert werden. Die feinste Diskretisierung des Lösungsraumes erfolgt, wenn alle möglichen Kombinationen der Operationen aus den vier Teilschrittketten bestimmt werden:

Dazu zählen die Möglichkeiten für den Aufbau der ersten Konfiguration, die Möglichkeiten der Rekonfiguration und die Möglichkeiten für den Abbau der letzten Konfiguration. Besteht eine Greiferfingerkonfiguration aus höchstens k Elementen so kann maximal $k - 2$ Mal demontiert und $k - 2$ Mal montiert werden (siehe Tabelle 7-2). Der Aufbau der ersten Konfiguration setzt sich aus einer Anzahl n_m von Montageschritten und einem Schließen der kinematischen Kette zusammen, wobei $n_m \in \{0, 1, \dots, k - 2\}$. Damit gibt es $n_m = k - 1$ Möglichkeiten die erste Konfiguration aufzubauen (A_Frech, 2023, S. 43–46).

Die Rekonfiguration von einer Startkonfiguration zu einer Zielkonfiguration besteht aus dem einmaligen Öffnen der Kette, einer Anzahl von Montage- und Demontageschritten sowie einem abschließenden Schließen der Kette. Für die Anzahl der Montageschritte n_m und Demontageschritte n_d gilt $n_m \in \{0, 1, \dots, k - 2\}$ und $n_d \in \{0, 1, \dots, k - 2\}$. Sowohl für n_m und n_d gibt es auch hier $k - 1$ Möglichkeiten. Da Montage- und Demontage-

Schritte unabhängig voneinander sind, ergibt sich die Gesamtzahl der Kombinationen für die Rekonfiguration als Multiplikation von n_m und n_d (siehe Formel 7-2) (A_Frech, 2023, S. 49–51).

$$N_{\text{Rekonfiguration}} = n_m \cdot n_d = (k - 1) \cdot (k - 1) = (k - 1)^2 \quad 7-2$$

Der Abbau der letzten Konfiguration auf die Greiferfingerbasis setzt sich zusammen aus dem Öffnen der Kette und einer Anzahl n_d von Demontageschritten zusammen, wobei $n_d \in \{0, 1, \dots, k - 2\}$. Damit gibt es $n_d = k - 1$ Möglichkeiten die letzte Konfiguration abzubauen. Der Fall, dass sich von einer Startkonfiguration zu einer Zielkonfiguration nichts ändert kann auch vorkommen und ergibt eine weitere Möglichkeit. Damit ergeben sich insgesamt folgende mögliche Kombinationen:

$$\begin{aligned} N_{\text{Gesamt}} &= n_m + (n_m \cdot n_d) + n_d + 1 = (k - 1) + (k - 1)^2 + (k - 1) + 1 \\ &= (k - 1)^2 + 2k - 1 \end{aligned} \quad 7-3$$

Für den kombinierten Nutzwert muss jeder Möglichkeit aus N_{Gesamt} ein Erfüllungsgrad zwischen eins und fünf zugewiesen werden. Damit ergibt sich die Auflösung für den Nutzwert des Rekonfigurationsaufwandes zu:

$$\Delta x = \frac{5 - 1}{N_{\text{gesamt}}} \quad 7-4$$

Angewendet auf den in Kapitel 6.3 abgeschätzten Baukastenumfang von 12 Elementen und unter der Annahme, dass eine Konfiguration auch aus den $k = 12$ Elementen bestehen kann, ergeben sich nach Formel 7-2 144 Kombinationen und die Auflösung beträgt nach Formel 7-3 0,028.

7.3 Auswahl der geeignetsten Konfiguration

Das Ermitteln der geeignetsten Fingerkonfigurationen für ein Set an Handhabungsobjekten mit fester Reihenfolge entspricht einem Optimierungsproblem, das in Form eines gerichteten Schichtgraphen dargestellt werden kann. Jedes Handhabungsobjekt des Sets entspricht einer Schicht des Graphen. Für jede gültige Konfiguration für ein Handhabungsobjekt existiert ein Knoten auf der jeweiligen Schicht. Jeder dieser Knoten besitzt eine Gewichtung, die dem Nutzwert aus Formel 7-1 entspricht. Jeder Knoten einer Schicht ist über Kanten mit jedem Knoten der nächsten Schicht verbunden. Die Gewichtung der Kanten entspricht dem Rekonfigurationsaufwand zwischen den beiden

Konfigurationen. Ziel der Optimierung ist das Finden des Weges durch den gewichteten Schichtgraph entlang der Kanten mit den niedrigsten Rekonfigurationsaufwänden (A_Frech, 2023, S. 47).

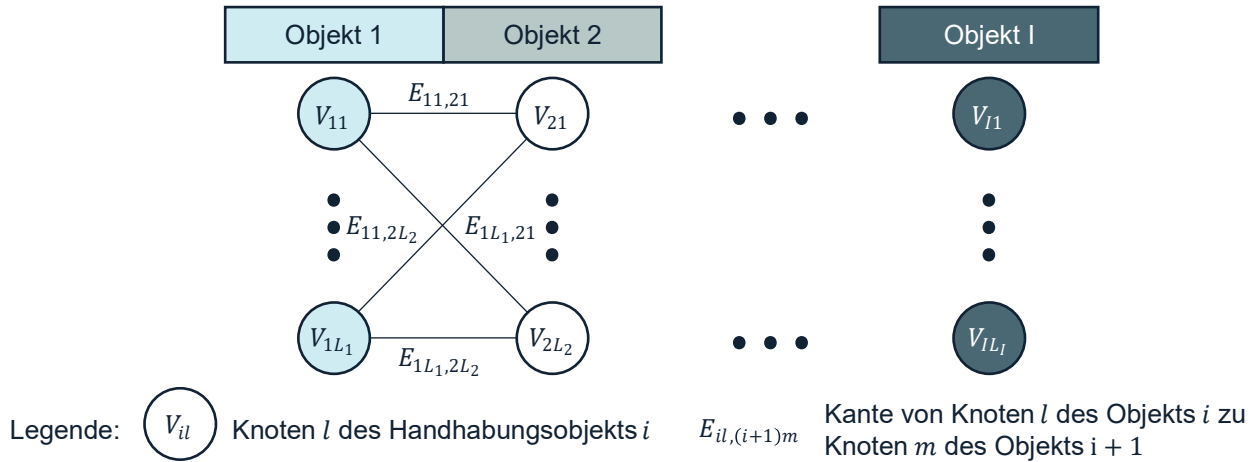


Abbildung 7-7: Graphische Darstellung des Optimierungsproblems (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 47))

Mathematisch kann die graphische Darstellung wie folgt beschrieben werden (A_Frech, 2023, S. 47):

$$J = \max \sum_{i=0}^I \sum_l^{L_i} \sum_m^{M_{i+1}} N_{il} \cdot X_{il} + R_{il,(i+1)m} \cdot Y_{il,(i+1)m} \quad 7-5$$

mit i als Index für das Handhabungsobjekt in der Abfolge von Handhabungsobjekten I , l als Index für die Konfiguration in einer Schicht mit L Konfigurationen, m als Index für die Konfiguration in der Folgeschicht mit M Konfigurationen.

Ein Knoten V_{il} hat den Nutzwert N_{il} , was dem Nutzwert der l -ten Konfiguration eines Objektes i entspricht. Die Kante $E_{il,(i+1)m}$ verbindet einen Knoten V_{il} mit einem Knoten $V_{(i+1)m}$ der Folgeschicht und trägt die Gewichtung $R_{il,(i+1)m}$. Zusätzlich werden zwei Aktivierungsfunktionen benötigt, die den Wert Eins oder Null annehmen können, je nachdem, ob ein Knoten oder eine Kante durchlaufen wird. Wird ein Knoten V_{il} durchlaufen, so wird die Aktivierungsfunktion X_{il} zu Eins. Wird eine Kante $E_{il,(i+1)m}$ durchlaufen, so wird die Aktivierungsfunktion $Y_{il,(i+1)m}$ zu Eins.

Um sicherzustellen, dass immer nur genau ein Knoten einer Schicht i und genau eine Kante zwischen den Schichten i und $i + 1$ durchlaufen werden, werden zwei Nebenbedingungen formuliert:

$$\sum_{i=0}^I \sum_{l=1}^{L_i} X_{il} = 1 \quad \text{für alle } i \quad 7-6$$

$$\sum_{i=0}^I \sum_{l=1}^{L_i} \sum_{m=1}^{M_{i+1}} Y_{il,(i+1)m} = 1 \quad \text{für alle } i \rightarrow i + 1 \quad 7-7$$

Entsprechend der in 7.1 beschriebenen Bewertungsmetrik, wird auch der Rekonfigurationsnutzwert einem von fünf gleichgroßen Intervallen zugeordnet, wobei jedes Intervall einem Erfüllungsgrad zwischen 1 und 5 entspricht. Zur Festlegung der Intervalle muss zunächst der Wertebereich definiert werden. Dieser ergibt sich aus dem minimalen und maximalen Rekonfigurationsaufwand. Der minimale Rekonfigurationsaufwand ist Null und entsteht, wenn kein Umbau erforderlich ist. Der maximale Rekonfigurationsaufwand entsteht, wenn für eine Rekonfiguration zwischen einer Startkonfiguration mit maximaler Modulanzahl und einer Endkonfiguration mit maximaler Modulanzahl alle Module ausgetauscht werden müssen, und es keine überschneidenden Modulsequenzen gibt.

Für die Auswahl der geeignetsten Konfigurationen wird ein Gesamtnutzenwert N_{ges} ermittelt, der sich als Quotient aus der Summe der Fingerqualitätsnutzwerte $\sum_{i=1}^n N_{Fingerqualität,i}$ und der Rekonfigurationsnutzwerte $\sum_{j=1}^{n-1} R_{Rekonfigurationsaufwand,(l-1) \rightarrow l}$ geteilt durch die Anzahl der Konfigurationsnutzwerte n und die Anzahl der Rekonfigurationsaufwände $n - 1$ ergibt (siehe Formel 7-8) (A_Frech, 2023, S. 50).

$$N_{ges} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{Fingerqualität,i} + \sum_{l=1}^{n-1} R_{Rekonfigurationsaufwand,(n-1) \rightarrow n}}{n + n - 1} \quad 7-8$$

Um dem Anwender die Möglichkeit zur Priorisierung der Fingerqualität oder eines geringen Rekonfigurationsaufwandes zu ermöglichen, werden die beiden Gewichtungsfaktoren x_F und x_R eingeführt. Damit ergibt sich der Gesamtnutzenwert zu:

$$N_{ges} = \frac{x_F \cdot \sum_{i=1}^n N_{Fingerqualität,i} + x_R \cdot \sum_{l=1}^{n-1} R_{Rekonfigurationsaufwand,(n-1) \rightarrow n}}{x_F \cdot n + x_R \cdot (n - 1)} \quad 7-9$$

mit $x_F = 1 - x_R$

Algorithmen zum effizienten Auffinden von kürzesten oder kostengünstigsten Pfaden zwischen Knoten in einem Graphen benötigen einen Start- und einen Zielknoten für die Suche. Übertragen auf die Fingerkonfigurationen muss der Schichtgraph um diese

Knoten erweitert werden, die den Nutzwert Null haben. Sowohl der Start- als auch der Zielknoten entsprechen dabei einem Greifer ohne Finger. Der Startknoten ist mit jedem Knoten der ersten Schicht und der Zielknoten mit jedem Knoten der letzten Schicht des bisherigen Graphen verbunden (siehe Abbildung 7-8) (A_Frech, 2023, S. 50–51).

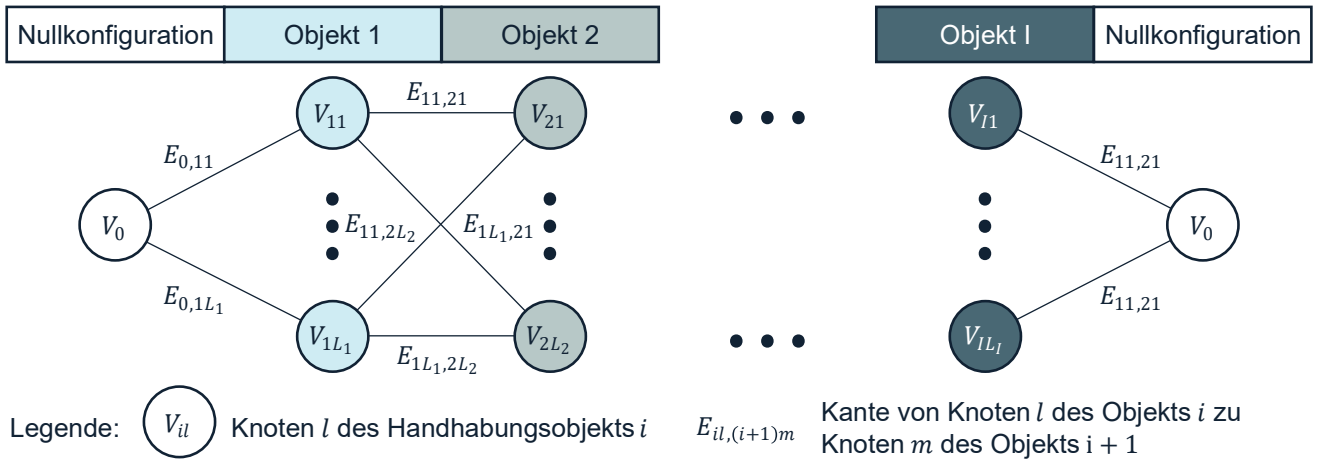


Abbildung 7-8: Graphische Darstellung des Optimierungsproblems für Algorithmen (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 51))

Ausgehend von einem Greifer ohne Finger müssen in der Formel 7-9 noch die Rekonfigurationsaufwände berücksichtigt werden, die sich durch die Montage der ersten und die Demontage der letzten Konfiguration ergeben.

$$N_{ges} = \frac{x_F \cdot \sum_{i=1}^n N_{Fingerqualität,i} + x_R \cdot (R_{Re.,0 \rightarrow 1} + \sum_{l=1}^{n-1} R_{Re.,(n-1) \rightarrow n} + R_{Re.,n \rightarrow 0})}{x_F \cdot n + x_R \cdot (n + 1)} \quad 7-10$$

Für den Fall, dass in einem kontinuierlichen Betrieb ein zyklisches Umbauen der Fingerkonfiguration erfolgt, beginnt der Graph nicht mit einer Nullkonfiguration. In diesem Fall werden die Fingerkonfigurationen gesucht, die für einen zyklischen Umbau am besten geeignet sind. Da in einem zyklischen Betrieb die Finger nie vollständig demontiert werden, müssen die Rekonfigurationsaufwände zwischen der Nullkonfiguration und der ersten Schicht des Graphen zu Null gesetzt werden. Mit dem Beginn eines neuen Zyklus muss von der Konfiguration für das letzte Handhabungsobjekt des vorherigen Zyklus auf das erste Handhabungsobjekt des neuen Zyklus umgebaut werden. Die letzte Schicht im Graphen muss damit auch der ersten Schicht entsprechen. Abbildung 7-9 zeigt den veränderten Graph (A_Frech, 2023, S. 51–52).

Um die beste Konfigurationsreihenfolge zu ermitteln, wird der kürzeste Weg durch den Graphen gesucht. Je größer dabei die Anzahl an Handhabungsobjekten ist, desto

größer wird der Graph und damit auch der Lösungsraum. Der Einsatz von Algorithmen ist hier erforderlich.

Der Dijkstra-Algorithmus und der Bellman-Ford-Algorithmus zählen zu den effizientesten Algorithmen, um die optimale Lösung in einem Netzwerk mit nur einer Quelle zu finden, weshalb diese hier zur Lösung des Problems angewendet werden (AbuSalim et al., 2020, S. 2). Der wesentliche Unterschied liegt in den Kantengewichten und der Komplexität: Während der Dijkstra-Algorithmus nur mit nicht-negativen Kantengewichten arbeiten kann, arbeitet der Bellmann-Ford-Algorithmus auch mit negativen Kantengewichten. Die Zeitkomplexität, d.h. die Geschwindigkeit mit der der Algorithmus wächst, wenn der Graph größer wird, beträgt beim Dijkstra-Algorithmus $O(n^2)$ und beim Bellmann-Ford-Algorithmus $O(n \times m)$, wobei n für die Anzahl an Knoten und m für die Anzahl an Kanten im Graphen steht.

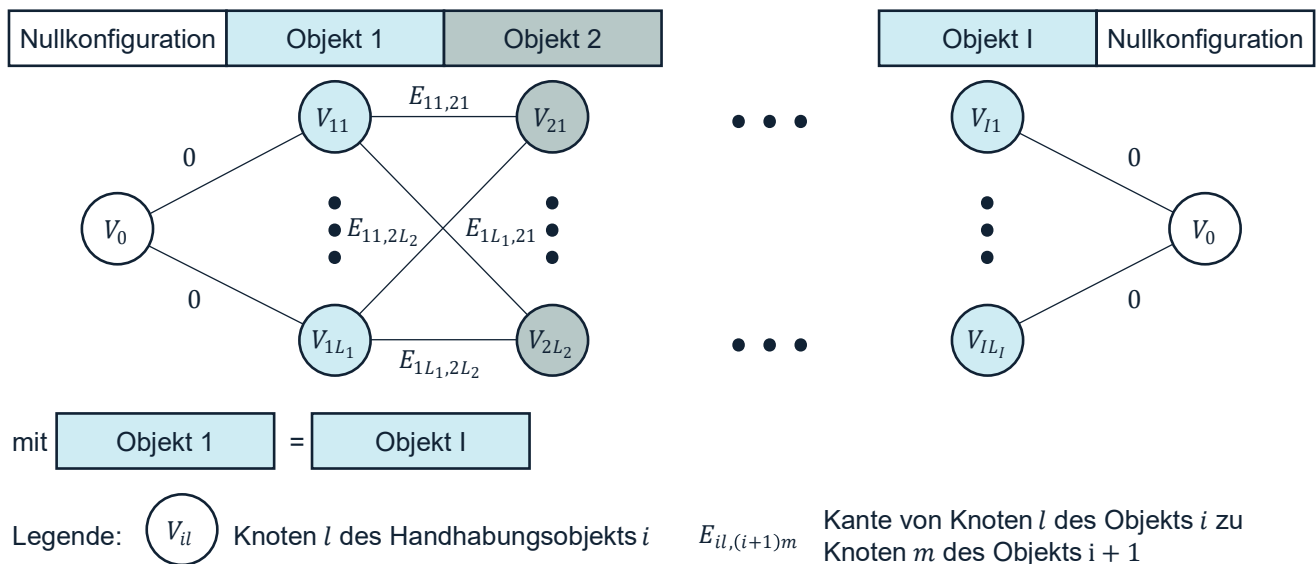


Abbildung 7-9: Aufbau des Graphen bei zyklischem Anwendungsfall, d.h. bei sich wiederholender Rekonfiguration zur Handhabung einer immer wiederkehrenden Handhabungsobjektreihenfolge (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 52))

Nach Abschluss der Bewertung kann der Zusammenbau der Greiferfinger und die Erprobung erfolgen. Dazu wird untersucht, ob mit der ermittelten Greiferfingerkonfiguration das jeweilige Handhabungsobjekt gehandhabt werden kann (A_Frech, 2023, S. 51–52). Das Ziel der Bewertungsphase ist das Auffinden der Konfiguration für ein Handhabungsobjekt oder der Konfigurationsabfolge für eine gegebene Abfolge von Handhabungsobjekten mit dem höchsten Gesamtnutzen.

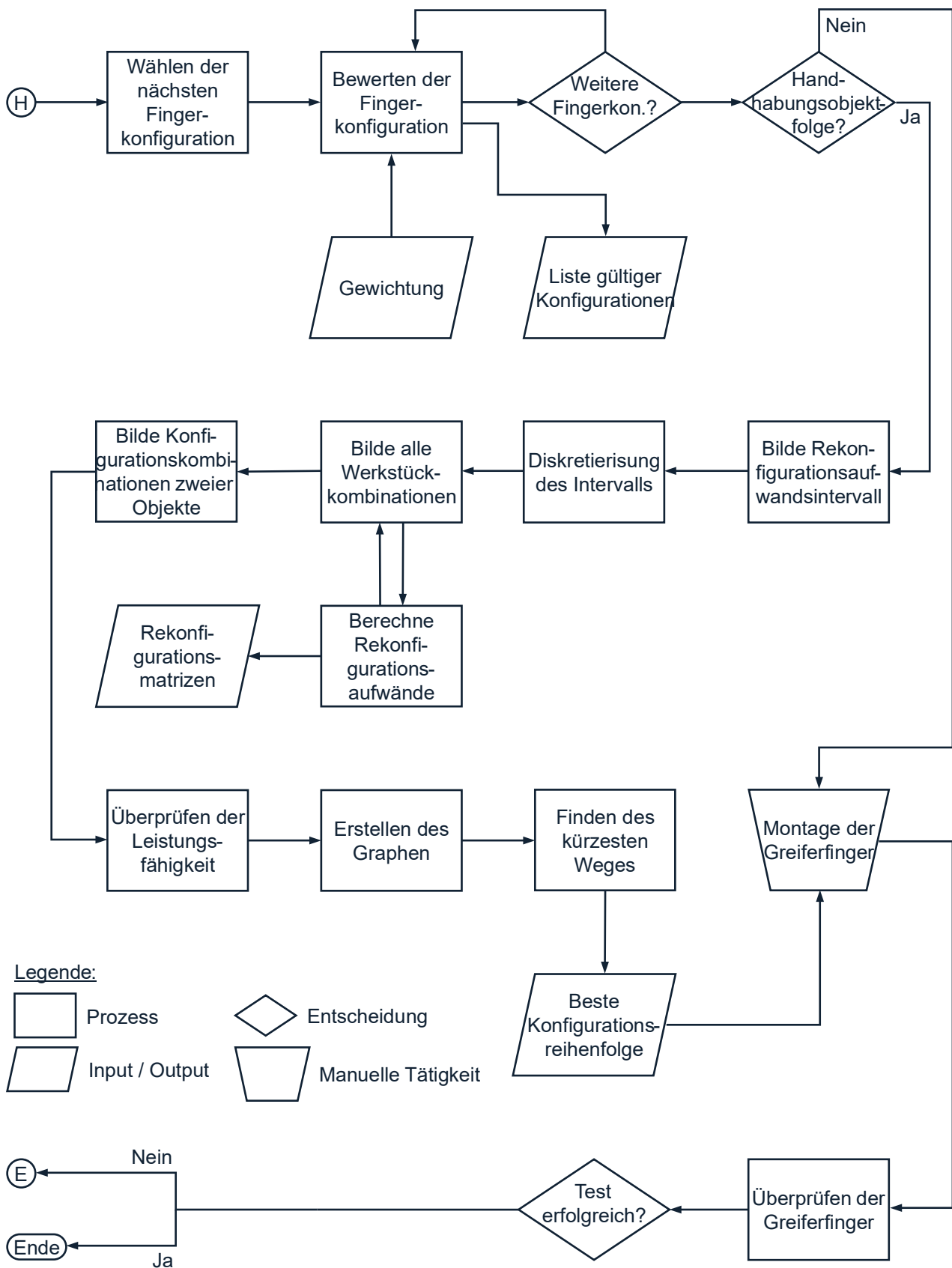


Abbildung 7-10: Ablauf der Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen

Die Auswahl der Konfiguration(en) hängt bei einzelnen Handhabungsobjekten von der Gewichtung der Bewertungsfaktoren und bei der Handhabungsobjektfolge zusätzlich von den Gewichtungsfaktoren der Fingerqualität und des Rekonfigurationsaufwandes ab.

Das in den vorherigen Kapiteln beschriebene Vorgehen zur Bewertung von Fingerkonfigurationen ist in Abbildung 7-10 visualisiert.

7.4 Ergebnis der automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger

Ergebnis des gesamten Vorgehens ist die für eine Handhabungsaufgabe am besten geeignete Fingerkonfiguration oder die für eine Handhabungsaufgabenfolge geeignetste Fingerkonfigurationssammlung, die anhand einer messbaren Bewertung identifiziert wurde. Darüber hinaus wurde bei praktischer Anwendung der Methode ein Greiferfingerbaukasten systematisch entwickelt, der ohne Veränderungen der Greifer eine schnelle Anwendung der Konfiguration für neue Handhabungsaufgaben ermöglicht (s. Erprobung in Kapitel 8).

Im folgenden Kapitel wird überprüft, ob in der praktischen Anwendung der Methode die zu erwartenden Ergebnisse erzielt werden können.


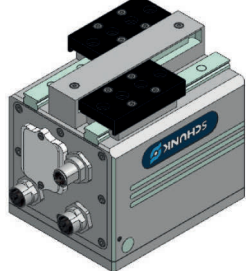
8 Erprobung der Vorgehensweisen

Mit der Erprobung wird überprüft, ob und unter welchen Randbedingungen die bis hierhin theoretisch beschriebene Vorgehensweise praktisch anwendbar ist, ob die Methode für ihre Aufgabe geeignet ist und ob die beabsichtigten Ergebnisse erzielt werden können.

8.1 Betrachtungsraum und Vorbemerkungen

Im Rahmen der Erprobung wird die Vorgehensweise exemplarisch am Beispiel von zwei Greifermodellen durchgeführt. Mit dem Fokus auf mechatronische Zweifingerparallelgreifer werden die Modelle EGI 80 und EGL 90 der Firma SCHUNK SE & Co. KG betrachtet.

Tabelle 8-1: Vergleich der betrachteten Greifermodelle

	EGI 80		EGL 90	
				
Versatz der Grundbacken [mm]	0,0		51,0	
Hub pro Backe [mm]	57,5		42,5	
Art der Backenbewegung	entgegengesetzt		Drive-by	
Max. Greifkraft [N]	100,0		600,0	
Max. zulässige Fingerlänge [mm]	200,0		165,0	
Länge X [mm]	175,0		112,0	
Länge Y [mm]	60,0		90,0	
Länge Z [mm]	97,5		108,0	
Kinematische Beschreibung				
Finger	links	rechts	links	rechts
Montageorientierung bezüglich \tilde{G}	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Montageposition bezüglich \tilde{G}	$\begin{pmatrix} -67,75 \\ 0,00 \\ 1,60 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 67,75 \\ 0,00 \\ 1,60 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -22,10 \\ 38,45 \\ 1,60 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 22,10 \\ -38,45 \\ 1,60 \end{pmatrix}$

Neben Unterschieden in den technischen Daten liegt der größte Unterschied zwischen den Modellen in der Bewegung der Grundbacken zueinander: Beim EGI 80 bewegen sich die beiden Grundbacken zwangsgesteuert entgegengesetzt auf **einer** Achse, beim EGL 90 hingegen auf **parallelen** Achsen. Tabelle 8-1 zeigt die wesentlichen Unterschiede.

8.2 Baukastengestaltung

8.2.1 Definition der Baukastenziele

In der Literatur werden verschiedene mögliche Zieldimensionen einer Entwicklung von Produktbaukästen beschrieben (u.a. Barg, 2018, S. 133–139; A_Gerber, 2020, S. 22–23; Kipp, 2012, S. 76). Angewendet auf die Entwicklung des modularen Greiferfingerbaukastens ergeben sich folgende Ziele in den Kategorien Flexibilität, Effizienz und Funktionalität:

Tabelle 8-2: Beschreibung der Baukastenziele für den modularen Greiferfingerbaukasten

	Ziel	Beschreibung
Flexibilität	Fit der konfigurierten Finger	Der Baukasten soll eine möglichst maßgeschneiderte Erfüllung individueller Anforderungen aus einer Handhabungsaufgabe ermöglichen.
	Steigerung der Produktionsflexibilität	Die Handhabung einer Vielzahl unterschiedlicher Werkstücke mit Fingern aus dem Baukasten ermöglicht eine flexible Handhabung in der Produktion und Montage auch bei Veränderungen im Produktprogramm.
	Steigerung der Fingerqualität	Durch die Verwendung von standardisierten Modulen soll die Qualität der konfigurierten Finger gegenüber individuell gestalteten Fingern gesteigert werden.
	Steigerung der Architekturflexibilität	Eine Standardisierung der Schnittstellen zwischen den Fingerelementen sowie zwischen Greifer und Finger führt zu einer höheren Flexibilität der Produktarchitektur.
	Steigerung der Rekonfigurierbarkeit	Eine Standardisierung der Schnittstellen zwischen den Fingerelementen sowie zwischen Greifer und Finger ermöglicht eine Anpassung der Finger

		hinsichtlich der Struktur oder Funktionalität.
	Steigerung der Architekturstandardisierung	Die Einführung einer Produktarchitektur für modulare Greiferfinger mit einheitlichen Schnittstellen und Modulen reduziert die Vielfalt notwendiger Komponenten, die zur Realisierung einer möglichst großen Fingervielfalt benötigt werden.
Effizienz	Reduzierung der Bereitstellungsdauer	Die Standardisierung von Greiferfingererelementen und Schnittstellen soll die schnellere und effizientere Bereitstellung und Verwendung neuer Greiferfinger ermöglichen.
	Steigerung der Prozessqualität bei Fingerwechsel	Die Verwendung standardisierter Schnittstellen kann zu einer Standardisierung des Ablaufs der Fingerwechsel führen und damit die Qualität und Sicherheit bei Fingerwechsel erhöhen.
Funktionalität	Unterstützung der Postponement-Strategie	Mit einer Postponement-Strategie wird die Produktvariantendifferenzierung, die durch eine vereinfachte Konfiguration zusätzlich unterstützt wird, auf den letztmöglichen Prozessschritt verschoben. Durch den späten Anpassungsprozess kann einfacher auf die tatsächliche Nachfrage reagiert werden
	Reduzierung nicht wertschöpfender Prozesse	Durch eine standardisierte Funktionsintegration in den Finger kann der nicht wertschöpfende Anteil an Handhabungsprozessen verkürzt werden.

8.2.2 Anforderungsanalyse

Unabhängig von der Art der Entwicklung stellen Anforderungen festgelegte, vorausgesetzte und verpflichtende Erfordernisse hinsichtlich der Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes dar. Der Baukasten soll für die Konfiguration von Greiferfingern zur Handhabung vieler verschiedener Werkstücke geeignet sein, daher werden in einem ersten Schritt die dafür bereits bekannten Anforderungen aus der Literatur ermittelt.

In Anlehnung an das Vorgehen nach (Honarpardaz et al., 2017, S. 116) liefert eine Suche mit dem Suchterm „*gripper AND (finger OR jaw) AND design*“ im Zeitraum von 1985 bis 2020 in der Datenbank Google Scholar 25.813 Ergebnisse. Zwar kann die Anzahl

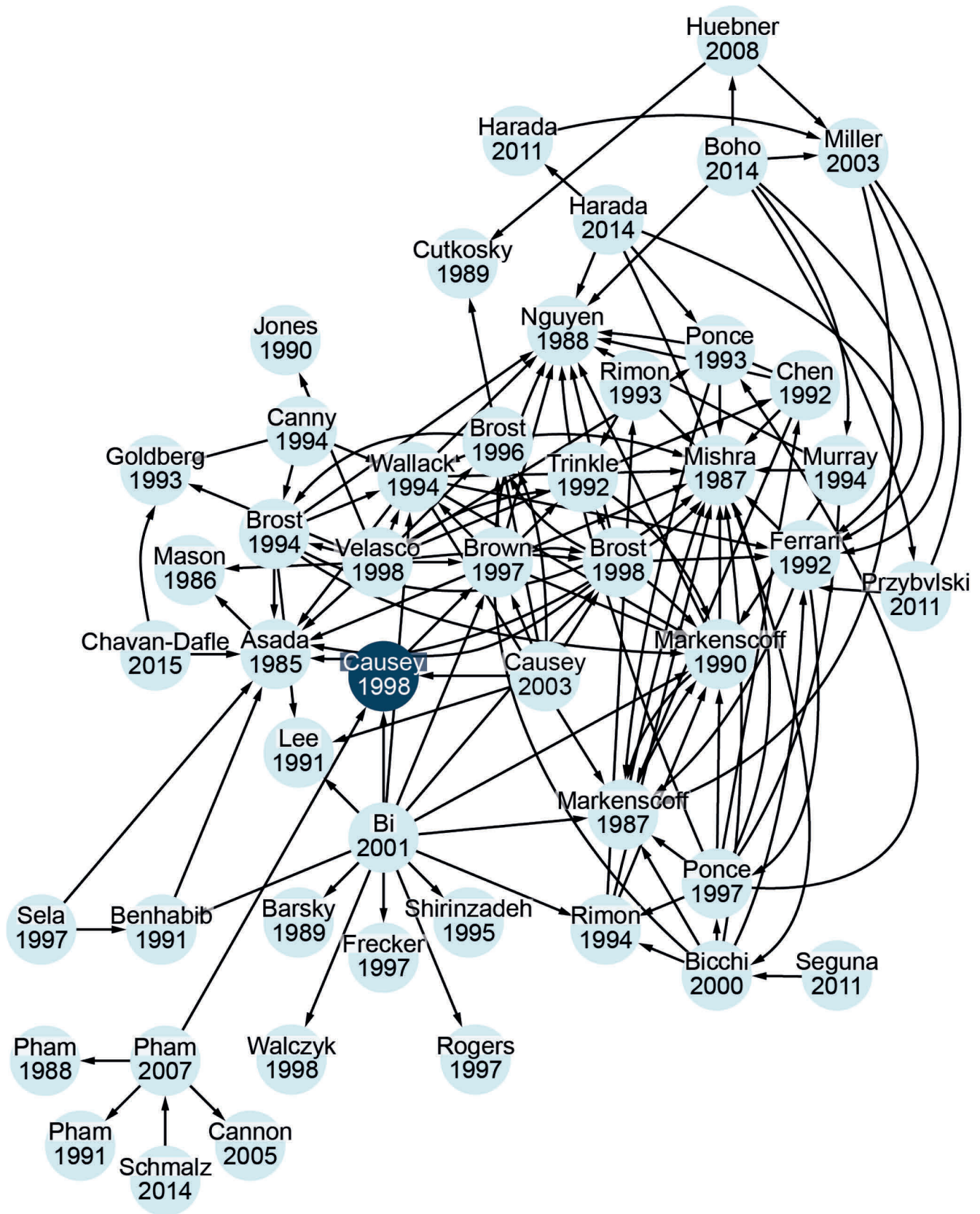


Abbildung 8-1: Zitationsnetzwerk ausgehend von Causey (1998)

durch Filtern mit Suchbegriffen in Titeln, Zusammenfassungen und Schlüsselwörtern auf 6.397 reduziert werden, jedoch sind in verbleibenden Dokumenten die

Anforderungen meist nicht explizit, sondern z.B. als Einschränkung, Anmerkung oder Anforderung eines Handhabungssystems erwähnt.

Damit muss ein Großteil der verbleibenden Literatur vollständig geprüft und Anforderungen müssen teilweise interpretiert werden. Es wird daher ein anderes Vorgehen gewählt: Ausgehend von relevanter Literatur wird über Zitationen weitere Literatur identifiziert, und die Verknüpfungen werden dokumentiert. Daraus ergibt sich dann ein Zitationsnetzwerk (siehe Abbildung 8-1), dessen Elemente vollständig geprüft werden können und als Grundlage für die Definition der Anforderungen dienen. In (Causey & Quinn, 1998) werden Richtlinien für die Gestaltung von Greifern beschrieben, die ebenfalls auch für Greiferfinger gelten. Daher wird ausgehend von diesem Dokument weitere Literatur identifiziert, die entweder das genannte Dokument zitieren oder in diesem zitiert werden. So wird in (Causey & Quinn, 1998) beispielsweise (Brown & Brost, 1997) zitiert und (Bi 2001), (Pham, Gourashi & Eldukhri, 2007) und (Causey 2003) zitieren das Startdokument. So kann das Netzwerk erweitert werden, bis die gefundene Literatur für die Suche irrelevant wird. Nach Umformulierung von identifizierten Rohanforderungen mit Hilfe der Satzschablonen nach (Rupp, 2021) ergeben sich die in Tabelle 8-3 aufgeführten Anforderungen. Die entsprechenden Quellen sind in Anhang A aufgeführt.

Tabelle 8-3: Anforderungen an Greiferfinger aus der Literatur

#	Anforderungen
1	Die Greiferfinger sollten gerade und kurz sein
2	Die Außenseite der Greiferfinger sollte die Möglichkeit bieten, benachbarte Werkstücke des betrachteten Werkstückes zu verschieben
3	Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte fähig sein, leicht aus der Position geratene Werkstücke richtig zu orientieren
4	Das Gewicht der Greiferfinger sollte gering sein
5	Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte die Möglichkeit bieten, einen möglichst großen Flächenkontakt zwischen Greiferfinger und Werkstück herzustellen
6	Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, mehrere Werkstücke zu greifen
7	Die Greiferfinger sollten die Fähigkeit bieten, weitere Funktionen (neben dem Halten) zu übernehmen
8	Die Greiferfinger sollten möglichst klein sein
9	Die Greiferfinger sollten nicht exakt positionierte Werkstücke sicher greifen
10	Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte die Reibung zwischen Werkstück und Greiferfinger maximieren
11	Die Greiferfinger müssen mit der Grundbacke des Greifers formschlüssig verbunden sein
12	Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, Werkstücke an konstanten Merkmalen zu greifen

- 13 Die Greiferfinger sollten aus leicht verfügbaren, handelsüblichen Komponenten bestehen
- 14 Die Wirkflächen der Greiferfinger sollten fähig sein, einen Kraftschluss zwischen Werkstück und Greiferfinger zu ermöglichen
- 15 Die Greiferfinger müssen die Distanz zwischen Greifer und Werkstück überbrücken
- 16 Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Werkstücke auch bei Größenschwankungen sicher zu greifen
- 17 Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, sich verändernde Werkstücke (Bearbeitung, Montage) sicher zu greifen
- 18 Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Werkstücke auch an empfindlichen Oberflächen sicher zu greifen
- 19 Die Greiferfinger sollten den Kontakt zum Werkstück an der größten Greiffläche herstellen
- 20 Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte sich an die Geometrie der Werkstücke anpassen
- 21 Die Greiferfinger müssen die Greifkraft des Greifers auf das Werkstück übertragen
- 22 Die Greiferfinger müssen mindestens auf einer Seite des Werkstücks einen Linien- oder Flächenkontakt herstellen
- 23 Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, das Werkstück an zwei parallelen Stellen zu greifen
- 24 Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte einen Ebenen-Ebenen-Kontakt zwischen Werkstück und Greiferfinger ermöglichen
- 25 Die Greiferfinger sollten den notwendigen Hub des Greifers minimieren
- 26 Die Greiferfinger müssen mindestens eine Griffweite vom horizontalen Abstand der beiden Greifpunkte realisieren
- 27 Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, Werkstücke möglichst nahe am Schwerpunkt zu greifen
- 28 Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, Werkstücke von außen zu greifen
- 29 Die Fingerspitze sollte die Möglichkeit bieten, Sensoren zu integrieren
- 30 Die Greiferfinger müssen mit dem Greifer sicher verbunden sein
- 31 Die Greiferfinger müssen fähig sein, Werkstücke bei auftretenden Kräften und Momenten sicher zu greifen
- 32 Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Sensoren in der Fingerspitze elektrisch zu versorgen
- 33 Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Signale zu übertragen
- 34 Die Greiferfinger müssen ausreichend steif in alle Richtungen sein
- 35 Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, schnell demontiert zu werden
- 36 Die Schnittstellenkomponenten sollten austauschbar sein
- 37 Die Lebensdauer der Greiferfinger sollte der des Greifers entsprechen
- 38 Die Wirkflächen der Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, wiederverwendet zu werden
- 39 Die Schnittstelle zwischen Greifer und Greiferfinger muss fähig sein, die Greifkraft des Greifers auf den Finger zu übertragen
- 40 Die Greiferfinger müssen einen Versatz der Greifergrundbacken ausgleichen

- 41 Die Greiferfinger sollten auf verschiedene Greifermodellen montierbar sein
 - 42 Die Sensorsignale sollten fingernah ausgewertet werden
-

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Anforderungen aus der Literatur stammen und das Aufstellen dieser Liste dem Nachweis der Durchgängigkeit der gesamten Methode dient. Dafür werden die Anforderungen zunächst einmal gleichgewichtet. Es erfolgt lediglich eine Einteilung nach der juristischer Verbindlichkeit mit der Verwendung der drei Schlüsselwörter „muss“, „sollte“ und „wird“. In einem konkreten, industriellen Anwendungsfall würde man zunächst eine Gewichtung vornehmen, um die dafür wichtigen Anforderungen zu priorisieren.

8.2.3 Modularisierung

Um sicherzustellen, dass der Greiferfingerbaukasten den gewünschten Zweck erfüllt, technisch machbar ist, effizient entwickelt werden kann und den Anforderungen entspricht, werden die Anforderungen mit Hilfe eines House of Quality in Funktionen übersetzt.

Für die Modularisierung nach technisch-funktionalen Gesichtspunkten werden, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, die Funktionen in einer DSM gegenübergestellt und die Beziehungen der Funktionen untereinander eindimensional mit der folgenden Skala bewertet (A_Gerber, 2020, S. 42):

- 0,5 - schwache Interaktion/Abhängigkeit
- 1 - normale Interaktion/Abhängigkeit
- 2 - starke Interaktion/Abhängigkeit

Damit ergibt sich die in Abbildung 8-2 dargestellte DSM.

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1

Abbildung 8-2: Ausgefüllte Design Structure Matrix

Aufgrund der DSM-Größe wird diese rechnergestützt mit dem IGTA ausgewertet. Mit den in Tabelle 8-4 genannten Parameterwerten wird bei 10 Durchläufen eine Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen den Durchläufen von 61,72 % erreicht.

Tabelle 8-4: Übersicht zu den IGTA-Parametern

Parameter	Bedeutung	Initialwert
<i>pow_cc</i>	Beeinflusst die Größe der Cluster bei der Berechnung der Coordination Costs. Je größer der Wert, desto kleiner werden die Cluster.	1
<i>pow_bid</i>	Beeinflusst die Größe der Cluster bei der Berechnung des Angebots (Bid). Für hohe Werte von <i>pow_bid</i> werden viele kleine Cluster erzeugt.	3
<i>pow_dep</i>	Steuert in der Berechnung des Angebots (Bid) die Berücksichtigung der Abhängigkeiten (Werte der DSM) zwischen den Elementen.	4
<i>max_Cl_size</i>	Beschränkt die Anzahl der Elemente pro Cluster.	0,5 * Anzahl der DSM-Elemente
<i>rand_accept</i>	Gibt an, wie oft (durchschnittlich) nur das zweitbeste Angebot (Bid) gewählt wird. Wahrscheinlichkeit = $1/\text{rand_accept}$	0,4 * Anzahl der DSM-Elemente
<i>rand_bid</i>	Beeinflusst, wie oft eine Lösung trotz Verschlechterung akzeptiert wird. Wahrscheinlichkeit = $1/\text{rand_bid}$	0,6 * Anzahl der DSM-Elemente
<i>times</i>	Wert beeinflusst, wie oft der Algorithmus neue Elemente zuordnet, bis die Stabilität des Systems überprüft wird. Anzahl der Durchläufe = <i>times</i> x Anzahl DSM-Elemente.	2
<i>stable_limit</i>	Gibt an, wie oft der Algorithmus ohne Verbesserung durchlaufen wird. Anzahl der Durchläufe ohne Verbesserung = <i>stable_limit</i> x <i>times</i> x Anzahl DSM-Elemente	2

Abbildung 8-3 zeigt die nach der Anwendung des IGTA-Algorithmus neu geordnete DSM. Darin sind die DSM-Elemente, die stark interagieren in Cluster zusammengefasst. Die Stärke der Interaktion ist mit Stärke der Punkte in der Abbildung dargestellt. Die roten Kästen zeigen die einzelnen Cluster.

Die Ergebnisse der Clusterbildung ergeben Cluster an DSM-Elementen, die in einem Modul zusammengefasst werden. Die Interpretation der Cluster liegt beim Anwender. Das in Abbildung 8-3 dargestellte, größte Cluster umfasst, je nach Durchlauf, die folgenden Elemente:

- Außengriffe ermöglichen
- Minimal notwendige Öffnungsweite realisieren

- Versatz der Grundbacken ausgleichen
- Greiferhub minimieren
- Werkstücke schwerpunktnah berühren
- Nachgiebigkeit minimieren
- Auskragung realisieren
- abweichende Objektabmessungen ausgleichen

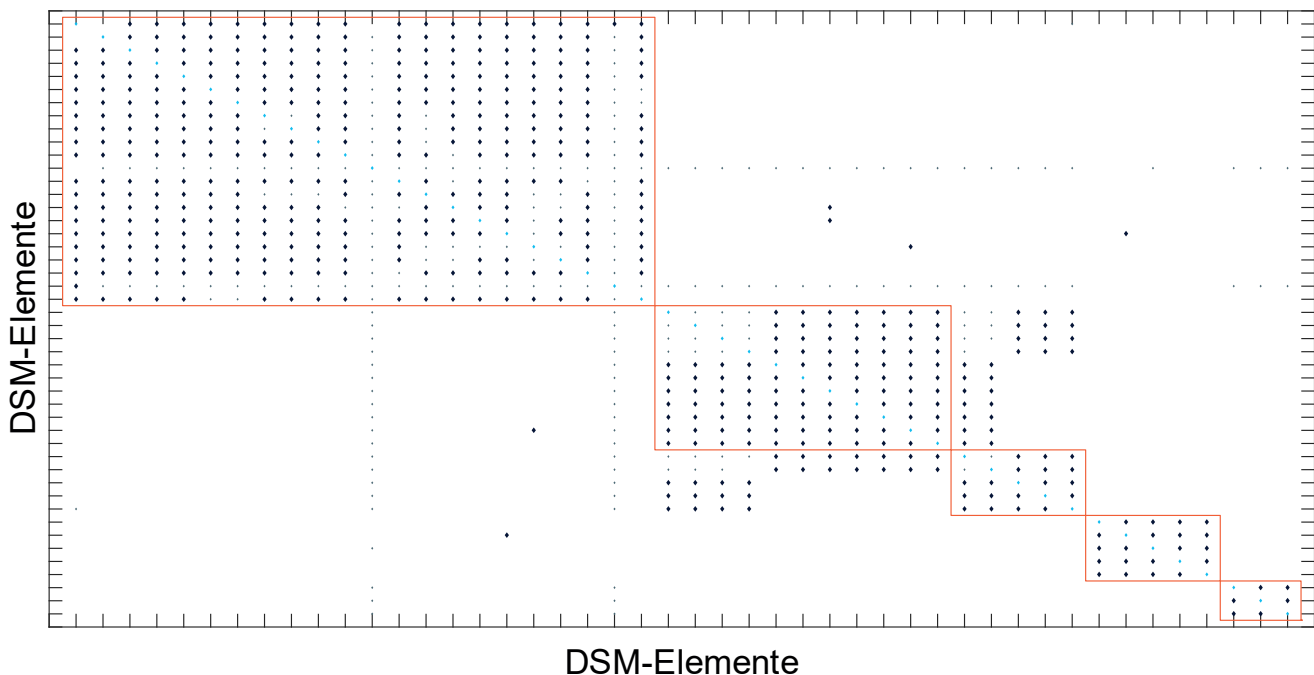


Abbildung 8-3: Ergebnisse der Clusterbildung nach Anwendung des IGTA

Ein Modultyp, der diese Merkmale in sich vereint, muss eine Auskragung in Greifrichtung zur Reduzierung des Greiferhubs und eine seitliche Auskragung, z.B. für den Ausgleich eines Versatzes der Grundbacken ermöglichen. Zusammengefasst handelt es sich um ein abgewinkeltes Modul. Übertragen auf alle identifizierten Cluster, ergibt sich ein Modulkonzept, das die folgenden fünf Modultypen umfasst:

- Typ A: Fingerbasis
- Typ B: gerades Fingerelement
- Typ C: abgewinkeltes Fingerelement
- Typ D: Fingerspitze (mit Wirkfläche und Sensorik)
- Typ E: Energieversorgung und Auswertung der Sensorik

Typ A bildet die Fingerbasis, verbindet den Finger mit dem Greifergrundkörper und übersetzt die Schnittstelle des Greifers in die des Baukastens. Die Modultypen B und C bestimmen wesentlich die Gestalt des Fingers und überbrücken die Distanz zwischen

der Greiferfingerbasis und der Fingerspitze. Modultyp D bildet den Greiferfingerabschluss, an dem der Kontakt zum Handhabungsobjekt erfolgt. Als einziger Modultyp mit direktem Kontakt zum Handhabungsobjekt ist hier auch die Integration von Sensorik vorgesehen. Modultyp E ist nicht Teil des Greiferfingers, sondern muss in den Greifergrundkörper integriert werden. Typ E umfasst die Energiebereitstellung für mögliche Verbraucher im Finger sowie die Auswertung von z.B. Sensordaten (A_Gerber, 2020, S. 48f.).

8.2.4 Schnittstellengestaltung

Die Standardisierung der Schnittstellen als Merkmal der Modularisierung ermöglicht erst die freie Kombinierbarkeit der Baukastenelemente (Salvador, 2007, S. 224). Abbildung 8-4 zeigt eine Schnittstellenübersicht des Greifergesamtsystems.

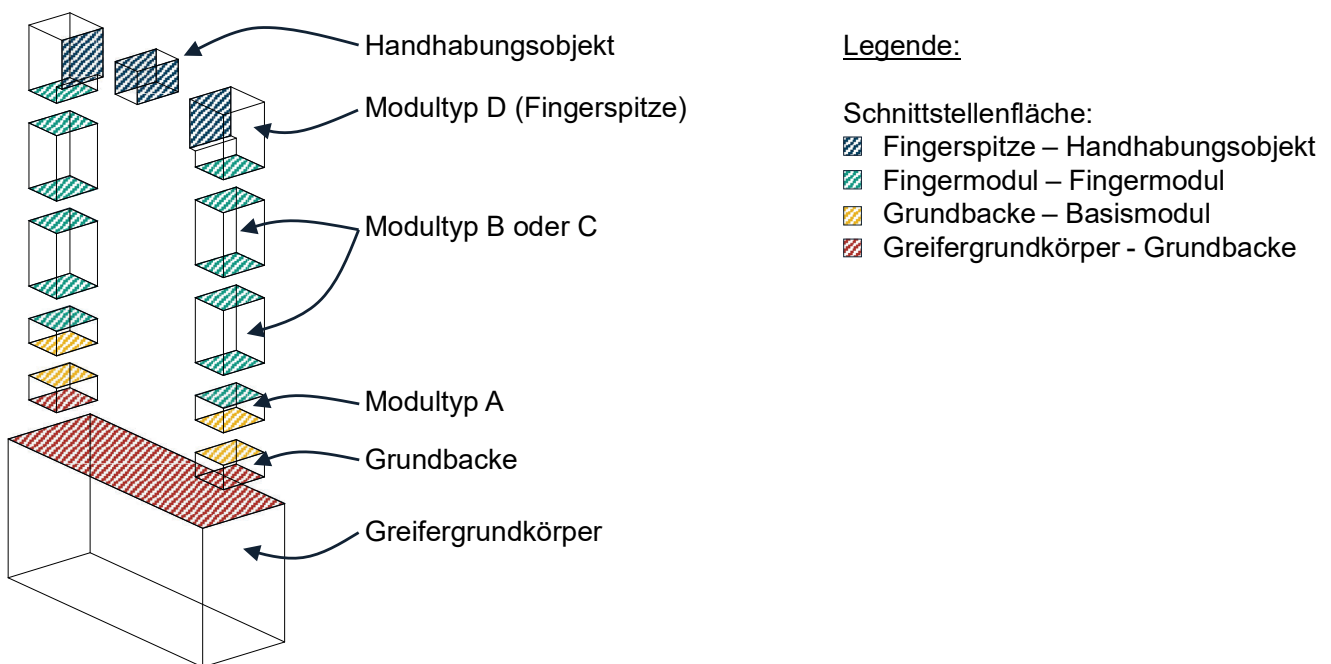


Abbildung 8-4: Schnittstellenübersicht des Greifergesamtsystems (Eigene Darstellung in Anlehnung an (A_Schabel, 2021, S. 25))

Die in Kapitel 8.2.2 definierten Anforderungen können für die Gestaltung der mechanischen und elektrischen Schnittstellen weiter spezifiziert werden. Allgemein gilt, dass Schnittstellen im Sinne der Modularisierung einfach gestaltet, standardisiert und dokumentiert sein sollten.

Tabelle 8-5: Anforderungen an die Schnittstellen (A_Schabel, 2021, S. 22)

#	Anforderungen
1	Die mechanische Schnittstelle muss Positionierungsgenauigkeit gewährleisten
2	Die mechanische Schnittstelle muss Kräfte und Momente übertragen
3	Die mechanische Schnittstelle muss ausreichende Greifkraft sicherstellen
4	Die elektrische Schnittstelle muss Energieversorgung der Sensorik bieten
5	Die elektrische Schnittstelle muss Signalübertragung enthalten (Protokolle I ² C, SPI, CAN und analoge Signalübertragung)
6	Die elektrische Schnittstelle muss Relativbewegung zwischen Grundbacke und Greiferbasis ermöglichen
7	Die elektrische Schnittstelle muss eine störungsfreie Energie- und Signalübertragung gewährleisten
8	Die mechanische Schnittstelle sollte Modulminiaturisierung begünstigen
9	Die mechanische Schnittstelle sollte eine einfache De-/ Montage der Module ermöglichen
10	Die mechanische Schnittstelle sollte Verschleißfestigkeit aufweisen/ Die Lebensdauer des Greifers nicht verringern
11	Die mechanische Schnittstelle sollte Steifigkeitsverluste gering halten
12	Die mechanische Schnittstelle sollte Formschluss zur Grundbacke aufweisen
13	Die elektrische Schnittstelle sollte Modulminiaturisierung begünstigen
14	Die elektrische Schnittstelle sollte eine einfache De-/Montage der Module ermöglichen
15	Die elektrische Schnittstelle sollte Verschleißfestigkeit aufweisen/ Die Lebensdauer des Greifers nicht verringern
16	Die elektrische Schnittstelle sollte eine einfache Modulintegration bieten
17	Die elektrische Schnittstelle sollte eine mechanische Verriegelung vermeiden
18	Die elektrische Schnittstelle sollte robust gegenüber Positionierungstoleranzen sein

Zusammengefasst ist die Hauptfunktion der Modulschnittstelle die Bildung einer lösba- ren Verbindung zwischen zwei Modulen. Dabei muss die mechanische Verbindung so erfolgen, dass die Module zueinander richtig positioniert und einfach miteinander verbunden werden können und gleichzeitig die elektrische Versorgung und der Signal- transport durch die elektrische Schnittstelle erfolgen kann. Durch die Kombination aus mechanischer und elektrischer Schnittstelle ergibt sich ein mechatronisches System, für das sich eine domänenspezifische Entwicklung nach der VDI-Richtlinie 2206 anbietet (A_Schabel, 2021, S. 27).

8.2.4.1 Mechanische Schnittstellenkomponente

Für den mechanischen Teil der Schnittstelle können verschiedene Kombinationen von Kraftübertragungs- und Verriegelungsformen genutzt werden. Oftmals entstehen dabei

hybride Verbindungen, die Merkmale sowohl kraft- als auch formschlüssiger Verbindungen aufweisen. Stoffschlüssige Verbindungen verhindern ein mehrfaches Öffnen und Schließen der Verbindungen, weshalb sie nicht für den Einsatz in modularen Greiferfingern geeignet sind. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen können acht Schnittstellenkonzepte für die mechanische Verbindungskomponente erstellt werden, die sich nach der Schlussform, der Verriegelungsform und der Notwendigkeit von Werkzeug zum Öffnen und Schließen der Verbindung unterscheiden lassen.

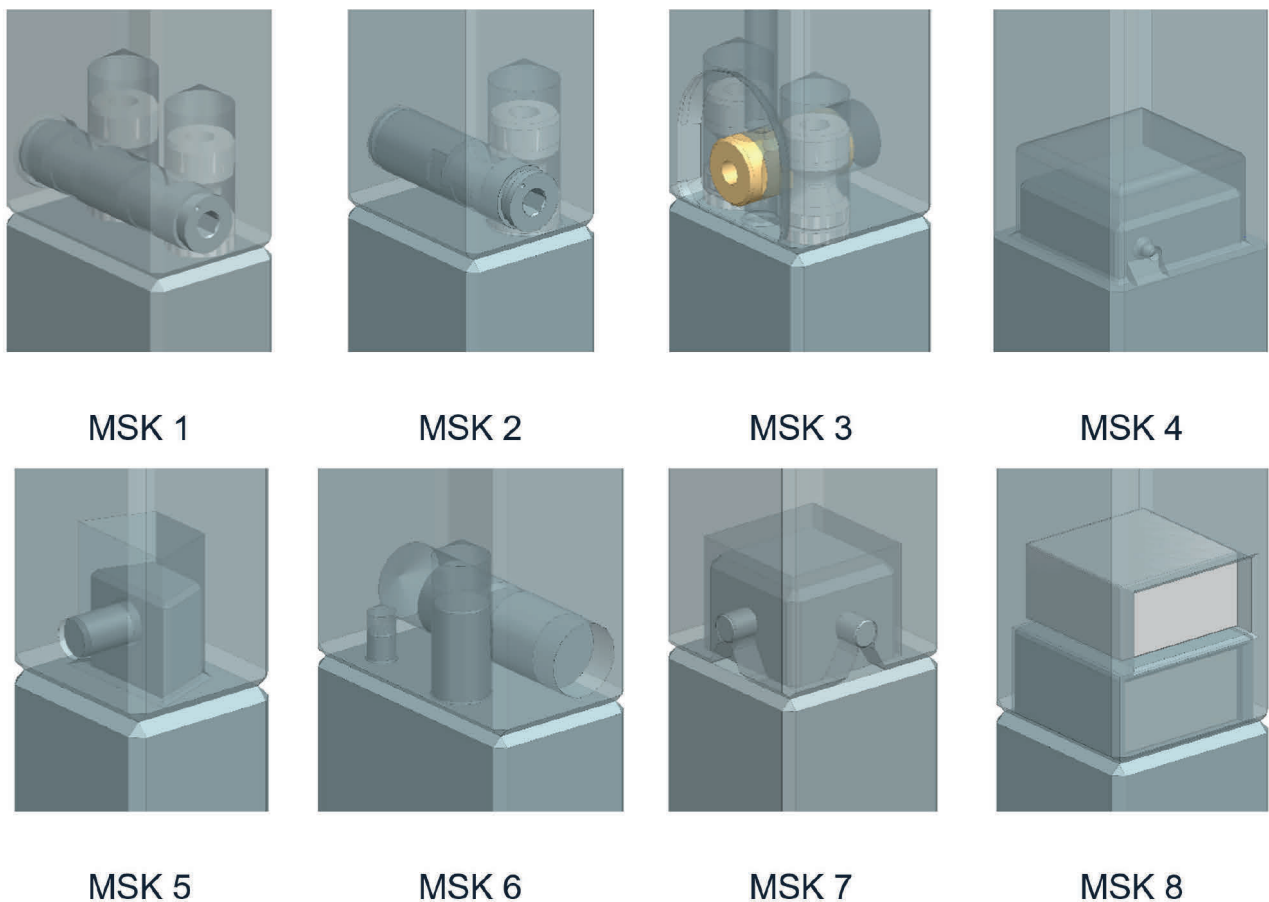


Abbildung 8-5: Mechanische Schnittstellenkonzepte MSK 1 bis MSK 8

Eine gängige Art zum schnellen Wechseln von Greiferfingern ist der Einsatz von Backenschnellwechselsystemen. Diese Systeme bestehen aus einer Basis, die fest mit dem Greifergrundkörper verschraubt wird, und zwei Adapterbolzen, die an den zu wechselnden Greiferfingern befestigt werden. Über eine formschlüssige Verriegelungsmechanik werden die Finger in Position gehalten. Um den Modulquerschnitt zu minimieren, nutzt **MSK 1** die kleinste Baugröße des Systems Schunk BSWS-PGZN-plus 50. Der Modulquerschnitt ergibt sich hierbei zu $379,75 \text{ mm}^2$.

Eine weitere Reduzierung der durch die Schnittstelle eingenommenen Fläche ist mit zwei Verriegelungsbolzen nicht möglich. Daher nutzt **MSK 2** die Kombination aus einem Bolzen (BSWS-AR 50) und einem Stift zur Positionierung. Dadurch muss die Länge des Verriegelungsbolzens (BSWS-UR 50) auf 17,1 mm reduziert werden. Die Fläche des Modulquerschnitts ergibt sich zu 320,00 mm² (A_Schabel, 2021, S. 29).

Für das **MSK 3** wird der werkzeuglose Verriegelungsmechanismus BSWS-M 50 genutzt. Ein federvorgespannter Verriegelungsbolzen ist standardmäßig verriegelt. Über das Betätigen der Entriegelungstaste (Linearbewegung mit 2 mm Hub) wird die formschlüssige Verbindung geöffnet. Die Modulquerschnitt beträgt dabei 378 mm². Das externe Betätigungselement bedeutet eine zusätzliche Störkontur, die sich beim Einsatz in modularen Greiferfingern nachteilig auswirken kann. Durch das Anpassen der Geometrie sowie der Integration einer entsprechenden Kavität in das Fingermodul kann die Störkontur minimiert werden (A_Schabel, 2021, S. 30).

MSK 4 nutzt federnde Druckstifte zur Modulverriegelung. Die Positionierung zweier Module zueinander erfolgt über entsprechenden Kavitäten an den Flächen der Modulschnittstellen. Über ein Außengewinde werden die Druckstifte in den Modulen montiert und erzeugen eine maximale Verriegelungskraft von 16 N. Beim Zusammenfügen von zwei Modulen werden die Druckstifte über Einführschrägen komprimiert. Für die Demontage wird ein Werkzeug benötigt. Der Modulquerschnitt ergibt sich zu 400 mm² (A_Schabel, 2021, S. 30–31).

Die beim Weiss Robotics FINGERKIT verwendete Verschraubung zur Modulverbindung wird in **MSK 5** aufgegriffen: Über seitliche Wirkflächen an der Flansch Kavität werden zwei Module zueinander positioniert und über eine Madenschraube fixiert. Dies ermöglicht einen sehr geringen Modulquerschnitt von lediglich 224 mm². Bei der Demontage muss die Madenschraube lediglich gelöst und nicht vollständig demontiert werden (A_Schabel, 2021, S. 31).

MSK 6 nutzt Rundspannelemente zur Fixierung von zylindrischen Stiften. Über eine Spannschraube werden die zwei Spannbacken linear aufeinander zubewegt und klemmen so den Stift. Eine Feder zwischen beiden Spannbacken bewegt diese in Ausgangsposition beim Öffnen der Spannschraube. Ein zusätzlicher Stift bei Konzept 6 eliminiert den verbleibenden, rotatorischen Freiheitsgrad. Die Querschnittsfläche der Module liegt bei 510 mm² (A_Schabel, 2021, S. 31).

MSK 7 baut auf der in (Xu, Kumar & Todorov, 2013) beschriebenen, werkzeuglosen Schnappverbindung auf. Eine zweite, um neunzig Grad verdrehte Schnappverbindung eliminiert den dabei verbleibenden, rotatorischen Freiheitsgrad. Durch den symmetrischen Aufbau ergibt sich die Querschnittsfläche zu 400 mm^2 (A_Schabel, 2021, S. 32). In Anlehnung an die in (Li, Gu & Ren, 2017) verwendete magnetische Modulverbindung nutzt **MSK 8** Magnete für die mechanische Verbindung sowie Modulkavitäten zur genauen Positionierung der Module zueinander. Genau wie bei den anderen symmetrischen Konzepten 4 und 7 liegt der Modulquerschnitt bei 400 mm^2 (A_Schabel, 2021, S. 32).

Tabelle 8-6 fasst die Eigenschaften der mechanischen Schnittstellenkonzepte zusammen:

Tabelle 8-6: Übersicht der mechanischen Schnittstellenkonzepte (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Schabel, 2021, S. 28))

#	Kraftschluss	Formschluss	Rotation	Translation	Werkzeug	
					Ja	Nein
1	x	x	x		x	
2	x	x	x		x	
3	x	x		x		x
4		x		x	x	
5	x	x	x		x	
6	x		x		x	
7		x		x		x
8	x					x

Der Vergleich der acht Schnittstellenkonzepte erfolgt anhand der zuvor definierten Anforderungen. Diese lassen sich zu den folgenden fünf Bewertungskriterien zusammenfassen:

- Miniaturisierung
- Montageaufwand
- Verschleißfestigkeit
- Steifigkeit
- Schlussart zur Grundbacke

Das Potential zur **Modulminiaturisierung** wird anhand der Querschnittsfläche der Module bewertet. Abbildung 8-6 zeigt die Schnittstellenquerschnitte der acht Konzepte.

Der De- bzw. Montageaufwand kann qualitativ bestimmt werden. Die Notwendigkeit eines (Spezial-) Werkzeuges bzw. die kompressive Schnappverbindung in Konzept 7 erhöhen den Aufwand.

Die **Steifigkeit** der Schnittstellenkonzepte bestimmt sich zu einem Großteil aus der Fingeraufbiegung während des Greifprozesses. Die Greiferfinger werden hauptsächlich auf Zug/Druck und Biegung belastet, wobei Zug/Druck Belastungen querschnittsflächenneutral ertragen werden. Bei gleichen Außenabmessungen sind quadratische Vollprofile als Querschnittsform am besten für die Greiferfinger geeignet (Haberhauer, 2018, S. 10f.; A_Höll, 2019, S. 16; A_Schabel, 2021, S. 32).

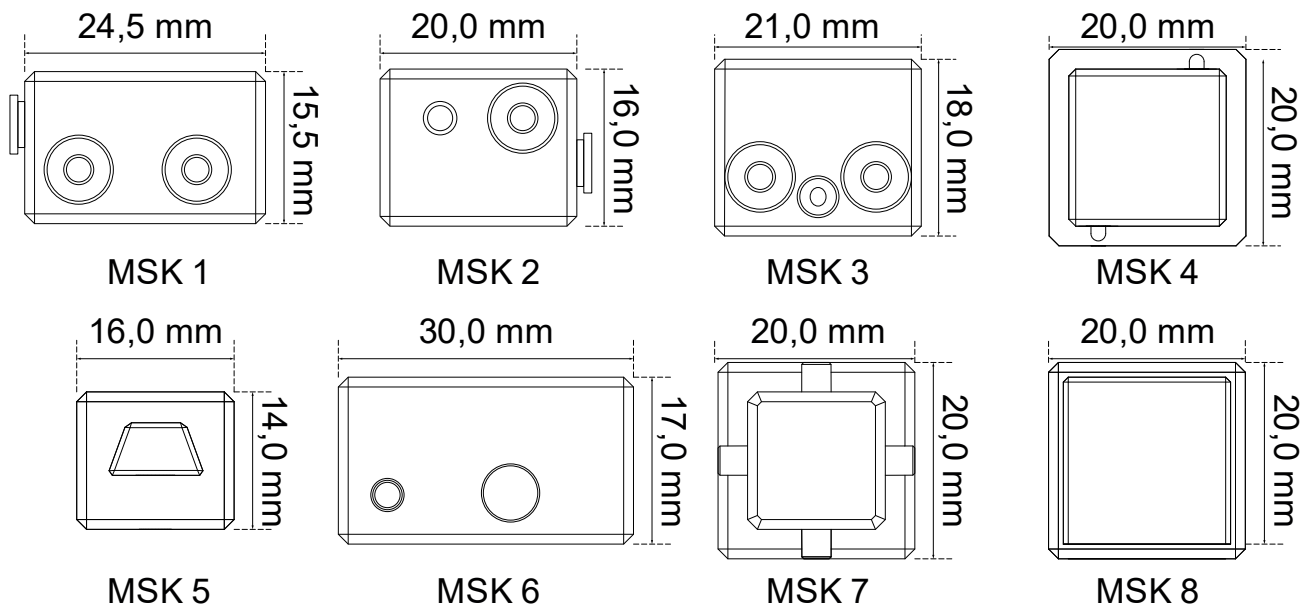


Abbildung 8-6: Querschnittsflächen der acht Schnittstellenkonzepte

Die Datenblätter der Greifer SCHUNK EGL 90 PN und SCHUNK EGI 80 PN definieren ein maximal zulässiges Gewicht für die Greiferfinger. Daraus lässt mit Formel 8-1 ein zulässiger Modulquerschnitt ermitteln, um die ebenfalls festgelegte zulässige Fingerlänge noch zu erreichen.

$$A = \frac{m_{zul}}{\rho \cdot l_{zul}} \quad 8-1$$

Für die beiden oft verwendeten Werkstoffe für Greiferfinger, die Aluminiumlegierung Al7005 und die Stahllegierung 42CrMo4, ergeben sich die Querschnitte zu:

$$A_{EGI80 PN, Al7005} = \frac{300 \text{ g}}{0,00278 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \cdot 200 \text{ mm}} = 539,57 \text{ mm}^2$$

$$A_{EGL90\ PN, Al7005} = \frac{500\ g}{0,00278\ \frac{g}{mm^3} \cdot 165\ mm} = 1090,04\ mm^2$$

$$A_{EG180\ PN, 42CrMo4} = \frac{300\ g}{0,0079\ \frac{g}{mm^3} \cdot 200\ mm} = 383,58\ mm^2$$

$$A_{EGL90\ PN, 42CrMo4} = \frac{500\ g}{0,0079\ \frac{g}{mm^3} \cdot 165\ mm} = 189,87\ mm^2$$

Es zeigt sich, dass die Verwendung von Stahl nur sehr geringe Querschnittsflächen erlaubt, um die maximal zulässige Fingerlänge erreichen zu können. Dies würde zwar die Miniaturisierung unterstützen, um damit die Störkontur der Greiferfinger zu minimieren, die verbleibende Querschnittsfläche wäre aber nicht ausreichend für die Unterbringung der erforderlichen mechanischen und elektrischen Schnittstellenkomponenten. Daher basieren alle weiteren Betrachtungen auf Aluminium als Werkstoff für die Baukastenelemente (A_Schabel, 2021, S. 33).

Die Aufbiegung der Greiferfinger resultiert aus einem Nachdrücken, d.h. einem weiteren Zusammenfahren der Grundbacken, z.B. zur Erreichung eines voreingestellten Motorstroms, nach Kontakt mit dem Handhabungsobjekt. Die Nachgiebigkeit der Greiferfinger sowie das Führungsspiel begünstigen in diesem Zusammenhang den Verschleiß der mechanischen Komponenten in Antrieb und Schnittstelle. Die Fingeraufbiegung bei maximal zulässiger Fingerlänge sowie maximaler Greifkraft kann berechnet und für den Vergleich bei einer FEM-Simulation genutzt werden. Vereinfacht kann der Greiferfinger als Biegebalken betrachtet werden. Da die Querschnittsabmessungen gegenüber der Fingerlänge vernachlässigbar gering sind, kann der Einfluss des Querkraftschubs auf die Biegung vernachlässigt werden (A_Schabel, 2021, S. 33–34).

Die folgende Abbildung 8-7 zeigt den Verlauf der idealisierten Biegung eines geraden Greiferfingers mit dem Querschnitt von $24,5\ mm \cdot 15,5\ mm = 379,75\ mm^2$ (Querschnitt von MSK 1) für die jeweils maximal zulässigen Fingerlängen des EGI 80 PN und EGL 90 PN. Die aufgebrachte Kraft F_x entspricht dabei der maximalen Greifkraft ($F_{x,max\ EGI80\ PN} = 50\ N$, $F_{x,max\ EGL90\ PN} = 300\ N$).

Für die jeweils maximalen Fingerlängen ergibt sich eine maximale Durchbiegung von $w_{EGL90\ PN}(l = 165\ mm) = 0,602\ mm$ und $w_{EG180\ PN}(l = 200\ mm) = 0,178\ mm$.

Zur Bewertung der Steifigkeit der acht Schnittstellenkonzepte anhand der Fingeraufbiegung werden FEM-Simulationen für jeweils eine Fingerkonfiguration der acht Konzepte, bestehend aus jeweils drei Modulen mit einer Länge von 50 mm, durchgeführt. Zusammen mit einer Basisplatte (Höhe 15 mm) erreicht eine Fingerkonfiguration damit eine Länge von 165 mm, was der maximalen Fingerlänge des SCHUNK EGL 90 PN entspricht.

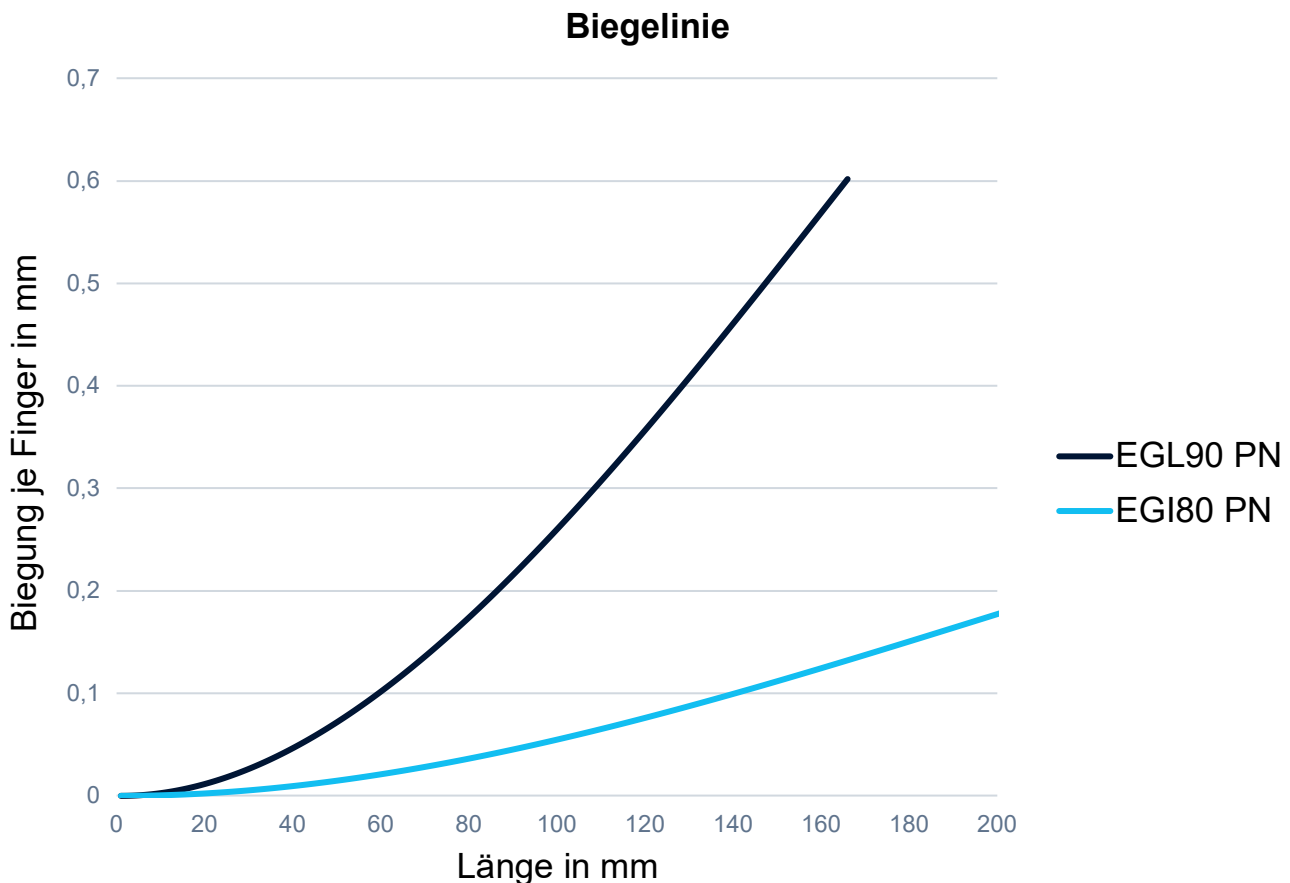


Abbildung 8-7: Biegeverlauf eines idealisierten, nicht modularen Greiferfingers (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Schabel, 2021, S. 34))

Zur Berechnung wird die in Siemens NX integrierte Simulationsumgebung mit dem Solver „NX Design Simulation“ verwendet. Die deutlich höhere Greifkraft des SCHUNK EGL 90 PN stellt bei der Berechnung der maximalen Fingeraufbiegung den kritischen Lastfall dar. Folgende Einstellungen werden dabei getroffen (A_Schabel, 2021, S. 34):

Den Modulen wird Aluminium (Siemens NX Materialbibliothek: „AL_6061“) und den Verbindungselementen Stahl (Siemens NX Materialbibliothek: „Steel“) als **Material** zugewiesen. Die **Vernetzung** erfolgt mit der 3D-Tetraederverknüpfung vom Typ CTETRA (Dreiecke) mit quadratischer Formulierung und zehn Knoten je Element. Der

Greiferfinger wird als **einseitig fest eingespannter Biegebalken** betrachtet, auf den als **Last** eine Kraft am Fingerende wirkt. Die durch das Handhabungsobjekt hervorgerufene Gewichtskraft wird nicht berücksichtigt, da diese gegenüber der Greifkraft vernachlässigbar ist. Abhängig davon, ob das Handhabungsobjekt von außen oder von innen gegriffen wird, kann der Finger in positive oder negative x-Richtung belastet werden. Daher wurden beide Lastfälle sowohl für die modularen Greiferfinger als auch für einen 150 mm langen Referenzfinger mit gleichem Querschnitt simuliert. Zur Bewertung wird der Quotient aus der maximalen Aufbiegung des modularen Fingers und der maximalen Aufbiegung des jeweiligen Referenzfingers ermittelt. Abbildung 8-8 zeigt die Ergebnisse einer Simulation beispielhaft für das MSK 1.

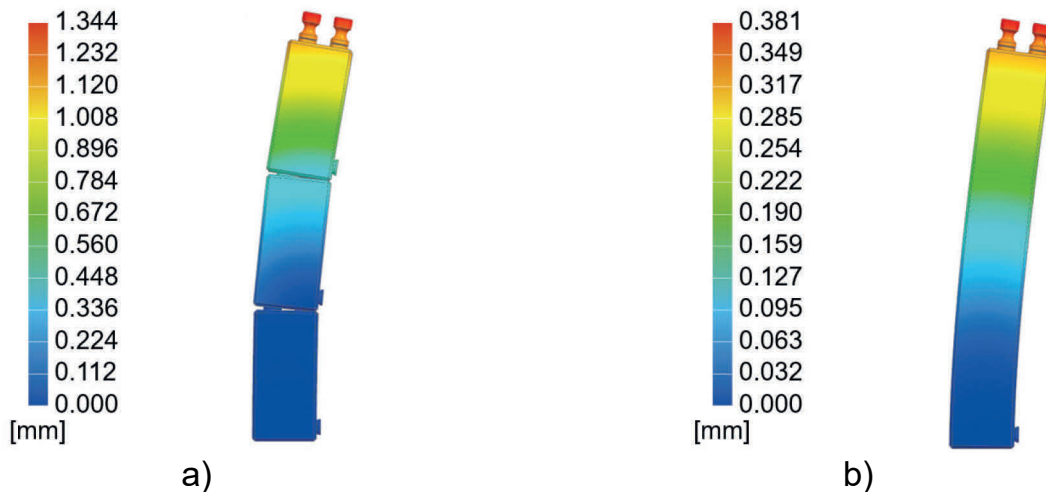


Abbildung 8-8: Vergleich der FEM-Simulationsergebnisse eines Greiferfingers aus Modulen mit dem MSK1 mit einem Referenzfinger gleicher Länge

Tabelle 8-7 zeigt die Ergebnisse für alle mechanischen Schnittstellenkonzepte. Der geringste prozentuale Anstieg der Fingeraufbiegung tritt beim MSK 7 auf.

Tabelle 8-7: Ergebnisse der durchgeführten FEM-Simulationen zur Fingeraufbiegung

#	W_{max} modularer Finger	$W_{max,Ref}$ Referenz- finger	Relation	$A_{Schnittstelle}$	A_{Modul}	$Z_{Schnittstelle}$
1	1,344 mm	0,381 mm	+358 %	304 mm ²	380 mm ²	21,5 mm
2	4,555 mm	0,613 mm	+743 %	252 mm ²	320 mm ²	21,5 mm
3	1,503 mm	0,500 mm	+301 %	314 mm ²	378 mm ²	21,5 mm
4	1,429 mm	0,478 mm	+299 %	400 mm ²	400 mm ²	10,0mm
5	3,492 mm	1,231 mm	+284 %	168 mm ²	224 mm ²	12,0 mm
6	5,104 mm	0,171 mm	+2.985 %	420 mm ²	510 mm ²	21,5 mm
7	1,081 mm	0,504 mm	+214 %	324 mm ²	400 mm ²	12,0 mm
8	2,875 mm	0,563 mm	+511 %	289 mm ²	400 mm ²	18,0 mm

Im Vergleich zum nicht-modularen Referenzfinger gleicher Länge und gleichen Querschnitts ergibt sich eine relative Zunahme von 214 %, was einem maximalen Wert von 1,081 mm entspricht. Die detaillierte Darstellung der Simulationsergebnisse aller Konzepte kann im Anhang B dieser Arbeit eingesehen werden. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse sind sämtliche Abbildungen um den Faktor 10 skaliert (10 % Modell).

Das letzte Bewertungskriterium der Verbindungsart wird von allen Schnittstellenvarianten in Form eines Formschlusses zur Grundbacke erfüllt.

Tabelle 8-8: Nutzwertanalyse mechanisches Schnittstellenkonzept

Kriterium	Gewichtung	Mechanisches Schnittstellenkonzept							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Miniaturisierung	4	3	4	2	2	5	1	2	3
De-/Montageaufwand	5	4	4	5	1	2	3	2	5
Verschleißfestigkeit	3	4	4	3	1	2	4	1	3
Steifigkeit	4	4	1	5	5	5	1	5	3
Formschluss zur Grundbacke	3	5	5	5	5	5	5	5	5
Summe		20	18	20	14	19	14	15	19
Summe gewichtet		75	67	77	51	71	50	56	73

Als Ergebnis der Nutzwertanalyse in Tabelle 8-8 kann festgehalten werden, dass die mechanischen Schnittstellenkonzepte 1 und 3 am besten für die Verwendung im Baukasten geeignet sind.

8.2.4.2 Elektrische Schnittstellenkomponente

Zur elektrischen Versorgung von Sensorik im Greiferfinger sowie zur Übertragung von Sensorsignalen aus dem Finger hin zur Stelle der Signalauswertung wird eine elektrische Schnittstellenkomponente benötigt. Die serielle Kommunikation mit den synchronen seriellen Protokollen SPI, I²C und CAN ist der am weitesten verbreitete Ansatz zur Übertragung von Informationen zwischen Datenverarbeitungsperipheriegeräten (A_Schabel, 2021, S. 37). Tabelle 8-9 gibt eine Übersicht zu den benötigten Leitungen je Kommunikationsprotokoll:

Sollten alle Protokolle gleichzeitig bedient werden, so werden mindestens zehn Kontaktpins benötigt. Zur weiteren Ausgestaltung der Schnittstelle wird im Folgenden zwischen zwei Schnittstellentypen für die elektrische Schnittstelle unterschieden:

- Schnittstelle zwischen dem Greifergrundkörper und dem Finger zur Verknüpfung des internen Moduls E mit der Basisplatte A (elektrischer Schnittstellentyp 1).

- Schnittstelle zwischen den Modulen des Baukastens (elektrischer Schnittstellentyp 2)

Tabelle 8-9: Übersicht der Pinbelegung für die Sensorkommunikation

Pin	Kommunikationsprotokoll		
	SPI	I ² C	CAN
1		Spannungsversorgung (5V)	
2		Erdung (GND)	
3	Taktleitung (SCLK)		
4	Datenleitung (MISO)		
5	Datenleitung (MOSI)		
6	Auswahlleitung (SS)		
7		Taktleitung (SCL)	
8		Datenleitung (SDA)	
9			CAN_HIGH
10			CAN_LOW

8.2.4.2.1 Elektrischer Schnittstellentyp 1

Wie oben erwähnt, ist das Modul E Teil des Greifergrundkörpers und kann nicht ohne weiteres in bestehende Greifer integriert werden. Daher können für die Schnittstelle nur konzeptionelle Vorschläge gemacht und auf Funktion überprüft werden.

Die Herausforderung bei dieser Schnittstelle liegt in der linearen Relativbewegung zwischen dem ortsfesten Modul E und der Basisplatte A in Verbindung mit dem geringen Bauraum und hohen Anzahl an Greifzyklen. In Maschinenanwendungen, wo Leitungen oder auch Medienschläuche dauerhaft bewegt werden, kommen meist Schleppketten zum Einsatz, in denen die Leitungen kontrollierte Biegebewegungen absolvieren. Eine Übertragung dieses Prinzips ist mit flexiblen Flachbandkabeln möglich, die über einen Stecker die Signale weiterleiten können. In das Modul A des Baukastens können entsprechende Stecker mit Flachbandkabelanbindung integriert werden. Als Verbindung zu Modul E kann ein weiterer Stecker mit Flachbandkabelanbindung verwendet werden. Über einen vertikalen Versatz zwischen der Steckerverbindung zu Modul A bzw. Modul E können beide Enden des Flachbandkabels relativ zueinander bewegt werden, ohne das Flachbandkabel zu knicken (A_Schabel, 2021, S. 37–38).

8.2.4.2.2 Elektrischer Schnittstellentyp 2

Die Gestaltänderung der Greiferfinger mittels Rekonfiguration der Module führt zu einer Vielzahl von (De-) Montagevorgängen an den Schnittstellen zwischen den Modulen. Im

industriellen Umfeld erfolgt die Übertragung von Energie und Signalen zwischen Komponenten weitestgehend kabelgebunden über Stecker-Buchse-Verbindungen (Grimske, 2014, S. 72). Diese formschlüssige Verbindung positioniert dabei die beiden Fügepartner zueinander. Im Sinne einer einfachen (De-) Montage der Module muss die mechanische Kopplung von zwei Modulen allein über die mechanische Schnittstellenkomponente erfolgen. Ein Prinzip, das die formschlüssige Stecker-Buchse-Verbindung durch eine kraftschlüssige Verbindung ersetzt, sind gefederte Kontaktpins, die durch ihre Gestaltung nicht positionsbestimmend sind (Grimske, 2014, S. 72). Abbildung 8-9 zeigt den Aufbau eines solchen Pins. Über federbelastete, axial verschiebbare Pins werden kraftschlüssige Verbindungen zwischen Stift und Gegenkontakt hergestellt. Die Federkontakte sind für bis zu einer Million Lastspiele ausgelegt und können sowohl Höhen- als auch Parallelitätsabweichungen, die sich z.B. bei der Fingeraufbiegung einstellen können, bis zu einem gewissen Maß ausgleichen (Mill-Max Mfg. Corp., 2023; A_Schabel, 2021, S. 39).

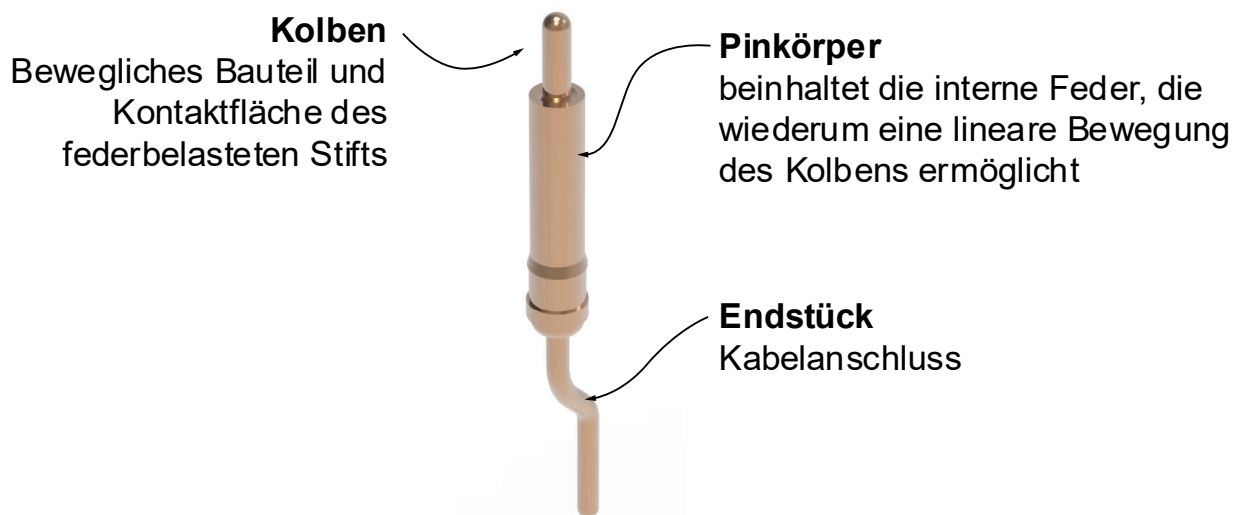






Abbildung 8-9: Federkontaktpin mit Komponenten

Diese Federkontakte können in Form von Federkontaktleisten mit zehn Pins jeweils an der Aus- und Eingangsschnittstelle der Module integriert werden. Die Signalübertragung zwischen den Steckern innerhalb eines Moduls kann über eine Platine erfolgen. Über die Verschraubung des Deckels wird die Platine und damit die gesamte Signalübertragung fixiert und so der definierte Sitz der Komponenten im Fingermodul ermöglicht (A_Schabel, 2021, S. 39).

Zusammengefasst ergeben sich folgende Schnittstellenkomponenten, die im Rahmen der Modulgestaltung in die Baukastenelemente integriert werden:

Tabelle 8-10: Übersicht der Schnittstellenkomponenten

Mechanische Schnittstelle		Elektrische Schnittstelle	
		Greifer / Modul	Modul / Modul
			
BSWS 50	BSWS-M 50	FFC-Flachbandkabel mit PCB-Konnektoren	Federkontaktschlüsse (platinengebunden)

8.2.5 Variantengerechte Gestaltung

8.2.5.1 Definition der Ziele einer variantengerechten Produktgestaltung

Die Entwicklung eines Anwenderbaukastens für Greiferfinger mit einer minimalen Anzahl von Modulen für eine festgelegte maximale Variantenvielfalt an Greiferfingern wird im ersten Schritt als Ziel der variantengerechten Produktgestaltung definiert. Die festgelegte, maximale (geometrische) Variantenvielfalt an Greiferfingern wird von den Greiferherstellern durch den Zusammenhang zwischen Fingerauskrugung und Fingerlänge definiert. Hierdurch ergibt sich ein Bereich, in dem alle zulässigen Greiferfingervarianten liegen. Aus den in Kipp (2012) definierten, allgemeinen Zielen können weitere untergeordnete Ziele abgeleitet werden:

Durch eine große Variantenvielfalt, die mit dem Baukasten abgedeckt werden soll, kann die kundenindividuelle Herstellung von Greiferfingern oder der auftragsspezifische Konstruktionsaufwand beim Greiferhersteller reduziert werden. Neue Greiferfinger entstehen damit vorwiegend durch **Konfiguration statt Konstruktion**. Mit einer Erhöhung von Standardumfängen in den Modulen können zudem **Skaleneffekte** erzielt und Stückkosten reduziert werden (A_Meschter, 2021, S. 37). Eine Reduzierung der internen Vielfalt kann andererseits die Komplexität der Module und damit den Konstruktionsaufwand und die Stückkosten steigern, weshalb bei der Entwicklung der Module auch die **Komplexitätsreduzierung** betrachtet werden muss.

8.2.5.2 Auswahl des zu betrachtenden Systems

Im Anschluss an die Zieldefinition wird das betrachtete System näher definiert. Während bei komplexen Produkten mit Hilfe einer Portfolioanalyse die Baugruppen und Komponenten zu identifizieren sind, die zur Zielerreichung einer größeren Variantengerechtheit betrachtet werden müssen, können aufgrund des einfachen Aufbaus der Greiferfinger aus wenigen Modulen alle Module betrachtet werden. Zusätzlich werden die Randbedingungen festgelegt, die die Gestalt und die Einsatzmöglichkeiten des Baukastens bestimmen (A_Meschter, 2021, S. 39–40):

1. Baukastenkompatibilität

Der Baukasten ist zunächst für die Verwendung mit den mechatronischen Zweifinger-Parallelgreifern SCHUNK EGI 80 und SCHUNK EGL 90 geeignet. Die Anschlussbilder bestimmen die Gestaltung des Modultyps A.

2. Fingerstruktur

Ein Greiferfinger, der aus den Modulen des Baukastens aufgebaut wird, hat immer dieselbe Struktur: Jeder Finger beginnt mit einem Modul vom Typ A und endet mit einem Modul vom Typ D. Dazwischen können kein, ein oder mehrere Module vom Typ B bzw. C eingefügt werden.

3. Anzahl und Modulvarianten

Die Anzahl der Varianten je Modultyp richtet sich nach deren Gestaltung. Ist beispielsweise Modultyp A so gestaltet, dass er für die betrachteten Greifer geeignet ist, so wird nur eine Variante von Typ A Teil des Standardbaukastens sein. Für die Modultypen B und C muss untersucht werden, welche Anzahl optimal ist, um die oben dargestellten Konfigurationsräume bestmöglich abzudecken.

4. Kombinationsmöglichkeiten

Alle Kombinationsmöglichkeiten, die mit dem Baukasten abgedeckt werden sollen, sind in den Abbildungen 8-10 a und b dargestellt. Der Baukasten muss eine Abwägung zwischen Variantenvielfalt und Baukastenumfang darstellen, woraus sich ein Streudiagramm in der Fläche unter den Kurven ergibt. Anhand der späteren Nutzung des Baukastens können dann die am häufigsten eingesetzten Fingervarianten ermittelt und für die weitere Optimierung des Baukastens verwendet werden.

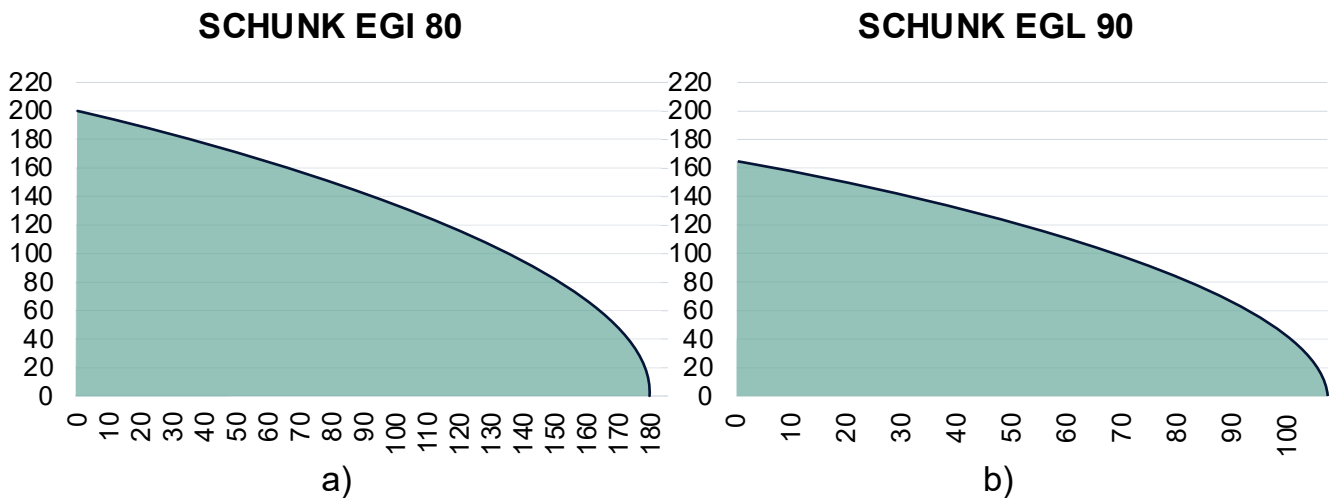


Abbildung 8-10: Kombinationsraum für den Baukasten bei beiden betrachteten Greifermodellen SCHUNK EGI 80 (a) und SCHUNK EGL 90 (b)

5. Modulumfang

Der Baukasten ist zunächst als geschlossener Baukasten in einer Baugröße geplant. Die zusätzliche Herstellung kundenindividueller Module durch den Anbieter des Baukastens oder den Anwender kann später umgesetzt werden.

6. Fingermontage

Der Zusammenbau der Fingervarianten erfolgt manuell. Ein Konfigurator ermittelt die Konfiguration und visualisiert die Fingervariante als Vorlage für den Anwender.

7. Notwendige Qualifikation

Die Module sollen so gestaltet sein, dass Personen mit mechanischen Grundkenntnissen nach einer Demonstration in der Lage sind, den Zusammenbau durchzuführen.

8. Zielmärkte und Vermarktung

Der Baukasten richtet sich an Endkunden sowie Systemintegratoren, die aktuell ihre Greiferfinger vollständig oder auf Basis von Fingerrohlingen konstruieren und fertigen. Eine Erweiterung des Anwendungsbereichs des Baukastens auf weitere Greifermodelle auch anderer Hersteller ist möglich.

8.2.5.3 Aufgabenklärung und Aufnahme der Vielfalt des Systems

Die Aufgabe besteht in der Entwicklung des Baukastens, weshalb im Folgenden nur die Aufnahme der Vielfalt erfolgt. Da Greiferfinger heute meist individuell gefertigt werden, gibt es kein bestehendes Produkt und keine Produktfamilie, deren Vielfalt analysiert werden kann. Ein vergleichbares Produkt stellt der Baukasten FiNGERKIT von WEISS Robotics dar (vgl. Kapitel 2.3.1), mit dem anwendungsspezifische Greiferfinger

aus standardisierten Elementen erstellt werden können (Weiss Robotics GmbH & Co. KG, 2019, S. 15). Für die Darstellung der aktuellen Vielfalt wird der Baukasten FiNGERKIT als Standardbaukasten ohne zusätzliche Module herangezogen und in einem VAM erfasst (Friedmann et al., 2022, S. 630). Abbildung 8-11 zeigt den Umfang des Baukastens sowie die einzelnen Module. Berücksichtigt wird ein Standardbaukasten mit fünf Greifeinsätzen, vier Basisplatten, zwei Eckverbindern, zwei Fingerelementen, einem T-Element und einem Distanzstück.

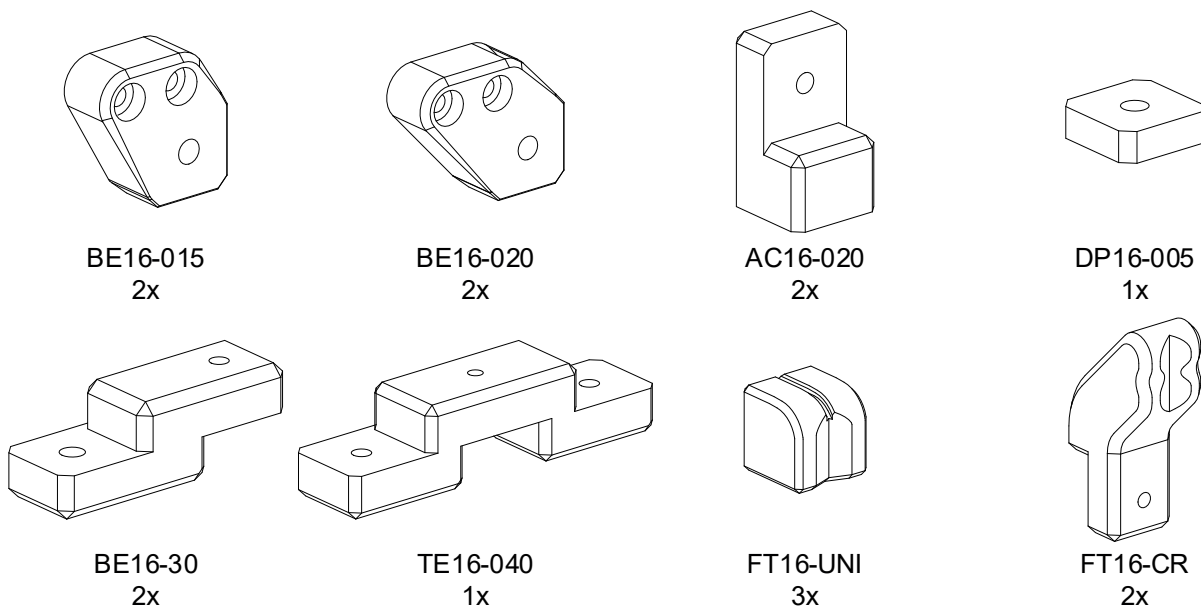


Abbildung 8-11: Weiss Robotics FiNGERKIT System 16 Starterset

8.2.5.3.1 Ebene der Unterscheidungsmerkmale

Die folgende Abbildung 8-12 zeigt den Ausschnitt eines Merkmalbaumes, der die Vielfalt an Anforderungen darstellt. Jeder Ast beschreibt dabei eine Fingervariante, die mit dem FiNGERKIT Baukasten erstellt werden kann. Die Relevanz der dabei ermittelten Unterscheidungsmerkmale nimmt von links nach rechts ab und die Darstellung im gesamten VAM beschränkt sich ausschließlich auf variante Elemente. Im Folgenden wird der Aufbau des Merkmalsbaums sowie die Merkmalskarten beschrieben. Der gesamte Merkmalbaum ist in Anhang C dargestellt.

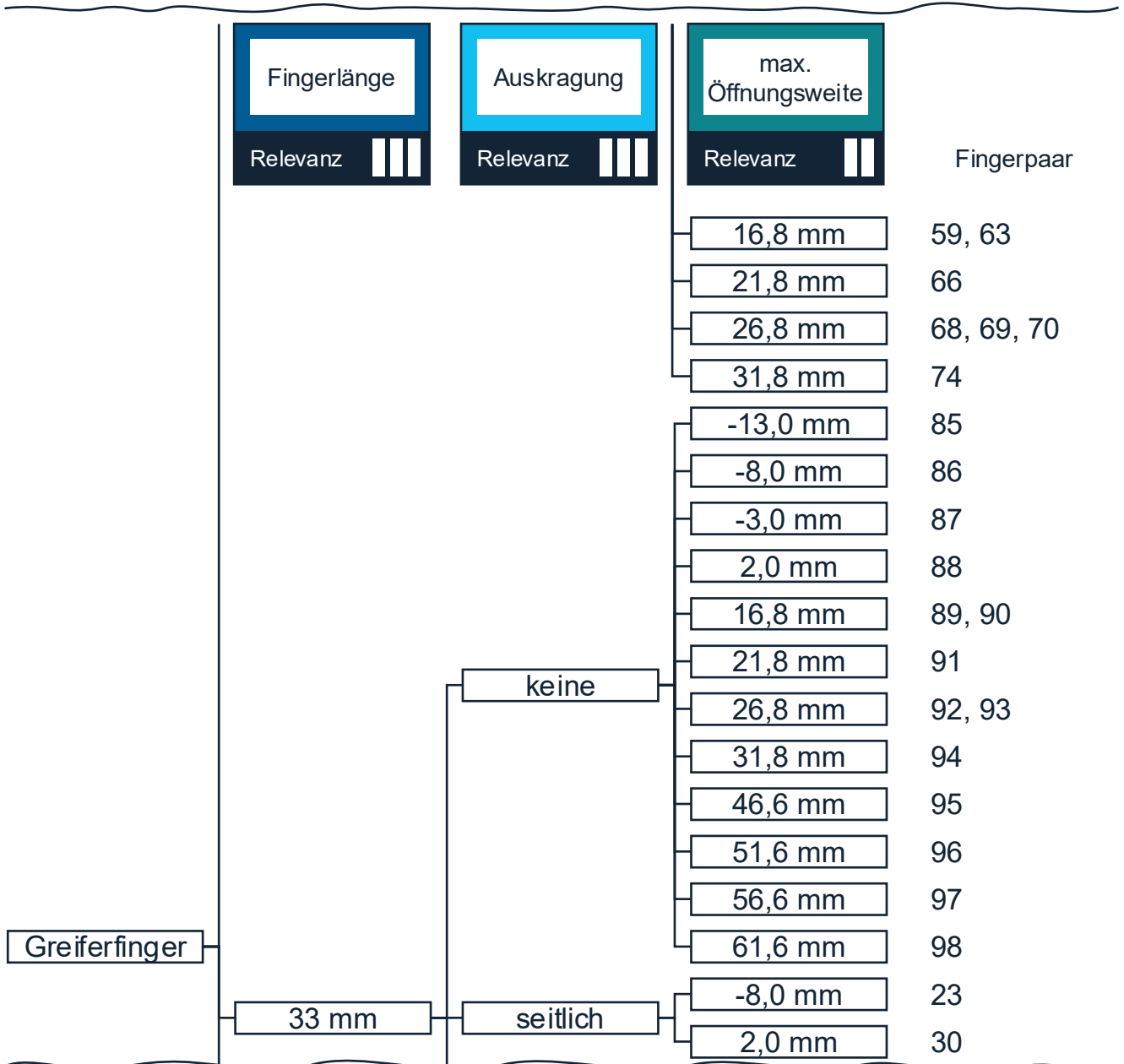


Abbildung 8-12: Ausschnitt aus dem Merkmalsbaum des Baukastens FINGERKIT (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 42))

Zum Ermitteln der Varianten werden die verschiedenen Fingerkonfigurationen im CAD aufgebaut und unzulässige Kombinationen aussortiert. Hierzu zählen Fingerkonfigurationen für Innengriffe und solche, die außerhalb der zulässigen Spezifikationen in Bezug auf die maximal zulässige Fingerlänge und das maximale Fingergewicht für die möglichen Greifer liegen. Eine Übersicht über alle Varianten ist in Anhang D abgebildet.

Durch einen Vergleich der Varianten können Unterscheidungsmerkmale identifiziert werden, für die jeweils eine Merkmalskarte abgeleitet wird. Alle Karten ergeben zusammen die erste Ebene des VAM. Die Fingervarianten unterscheiden sich in der

Fingerlänge, der Auskrägung sowie der Öffnungsweite. Die genannten Unterscheidungsmerkmale werden dabei wie folgt ermittelt: Die Größe des Fingers in Z-Richtung ergibt die Fingerlänge (Abbildung 8-13a). Die Auskrägung kann seitlich oder beidseitig sein, wobei die Größe als Distanz zwischen der Befestigungsbohrung des Fingers und der Mitte der Wirkfläche der Fingerspitze gemessen wird (Abbildung 8-13b). Die maximale Öffnungsweite wird in y-Richtung zwischen äußerer Befestigungsbohrung des Fingers und der Mitte der Wirkfläche der Fingerspitze gemessen, siehe (Abbildung 8-13c). Es sind damit positive beziehungsweise negative Abweichungen von der maximalen Öffnungsweite des verwendeten Greifergrundkörpers möglich (A_Meschter, 2021, S. 43–44). Jedes Unterscheidungsmerkmal wird hinsichtlich seiner Relevanz für den Anwender und die vorkommende Vielfalt bewertet (Kipp, 2012, S. 81–83).

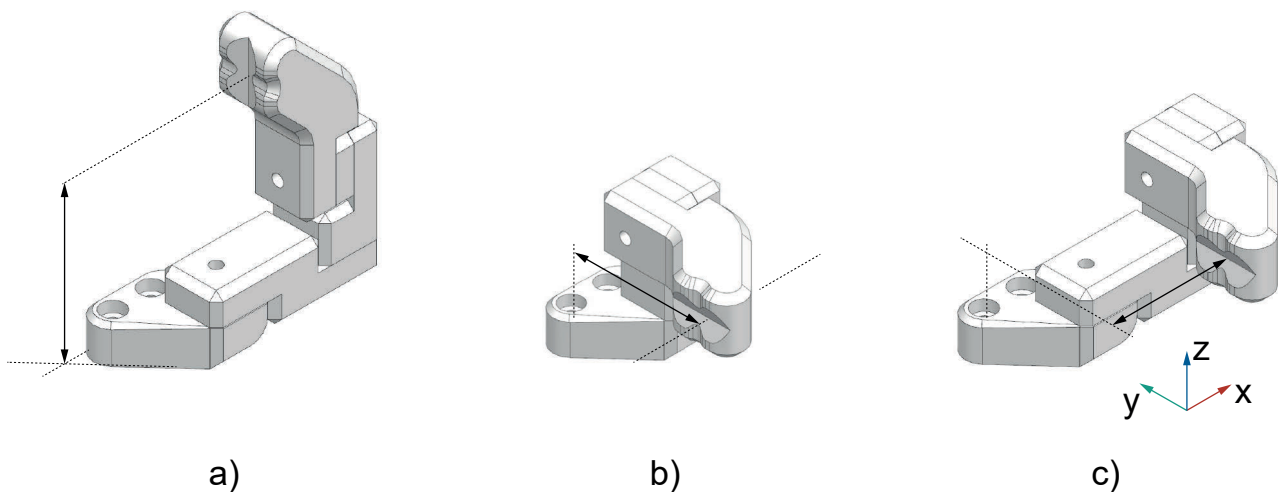


Abbildung 8-13: Verwendeten Maße Fingerlänge (a), Auskrägung (b) und Öffnungsweite (c)

Die Unterscheidung der Relevanz wird wie folgt vorgenommen (A_Meschter, 2021, S. 45):

- Erste Kategorie: Geringe Relevanz – Beeinflusst die Kundenentscheidung kaum
- Zweite Kategorie: Mittlere Relevanz – Beeinflusst die Kundenentscheidung deutlich
- Dritte Kategorie: Hohe Relevanz – Essenziell für die Bedürfnisbefriedigung, ohne gewünschtes Merkmal wird Produkt nicht für Kauf in Betracht gezogen

Bei der Gestaltung anwendungsgerechter Greiferfinger sind die Abmessungen sowie das (kollisionsfreie) Erreichen der Greifpunkte kritisch. Daher wirken sich alle Unterscheidungsmerkmale mindestens deutlich auf die Entscheidung des Anwenders aus,

wobei die Fingerlänge und die Auskrugung relevanter sind, da diese über das Erreichen der Greifposition entscheiden (A_Meschter, 2021, S. 45).

Die Vielfalt wird wie folgt unterschieden (A_Meschter, 2021, S. 45):

- Geringe Vielfalt – ein Balken: Maximal drei Ausprägungen
- Mittlere Vielfalt – zwei Balken: Vier bis zehn Ausprägungen
- Hohe Vielfalt – drei Balken: Mehr als zehn Ausprägungen

Gemäß den Kategorien fällt die Merkmalskarte der Fingerlänge mit sieben Ausprägungen in die zweite, die Merkmalskarte der Auskrugung mit drei Ausprägungen in die erste und die Merkmalskarte der Öffnungsweite mit 21 Ausprägungen in die dritte Kategorie.

Der Merkmalsbaum umfasst insgesamt 116 verschiedene Fingerpaare auf 86 Ästen. Es können sieben Fingerlängen zwischen 15 mm und 63 mm realisiert werden. Die Kombinationen mit den Fingerlängen 30 / 33 mm bzw. 60 / 63 mm ergeben sich durch die Verwendung verschiedener Fingerspitzen, was vom Hersteller nicht ausdrücklich untersagt wird. Die maximale Öffnungsweite variiert zwischen -13 mm und 62 mm (A_Meschter, 2021, S. 42f.). Die teilweise Mehrfachzuordnung von Fingerpaaren zu Ästen lässt sich zurückführen auf die Verwendung von Distanzstücken oder unterschiedlichen Fingerspitzen. Gemessen an den Unterscheidungsmerkmalen ergibt sich dadurch kein Unterschied für den Anwender.

8.2.5.3.2 Ebene der Funktionen

Die Visualisierung der Varianz auf der Funktionsebene erfolgt mit einer angepassten umsatzorientierten¹⁶ Funktionsstruktur. Die Varianz der Funktionen wird über die in Kapitel 2.4.2.4 genannten Kategorien dargestellt. Damit ergibt sich für den Baukasten FiNGERKIT die in Abbildung 8-14 dargestellte Funktionsstruktur.

Zur Übertragung der Greifkraft des Greifergrundkörpers auf das Handhabungsobjekt erfolgt zunächst eine Übertragung auf die Fingerbasis. Diese Funktion ist für alle Fingervarianten und -modelle gleich. Je nach Lage, Orientierung und Zugänglichkeit der Greifpunkte am Handhabungsobjekt müssen verschiedene vertikale Distanzen zwischen Greifergrundkörper und Werkstück überbrückt werden. Die Funktion hat damit unterschiedliche Ausprägungen (Kategorie 1) und wirkt sich direkt auf das

¹⁶ Eine umsatzorientierte Funktionsstrukturen richten sich nach den Energie-, Stoff- und Informationsflüssen im Produkt und zeigt mithilfe von Funktionen nach Art eines Blockschalbildes die Umwandlungen dieser Flüsse auf. Dabei folgen Zustände und Funktionen strikt aufeinander Krause und Gebhardt (2018, S. 76).

Unterscheidungsmerkmal der Fingerlänge aus. Befinden sich die Greifpunkte außerhalb der Greifachse, so muss die Fingergeometrie um eine seitliche Auskrugung ergänzt werden (A_Meschter, 2021, S. 46–47).

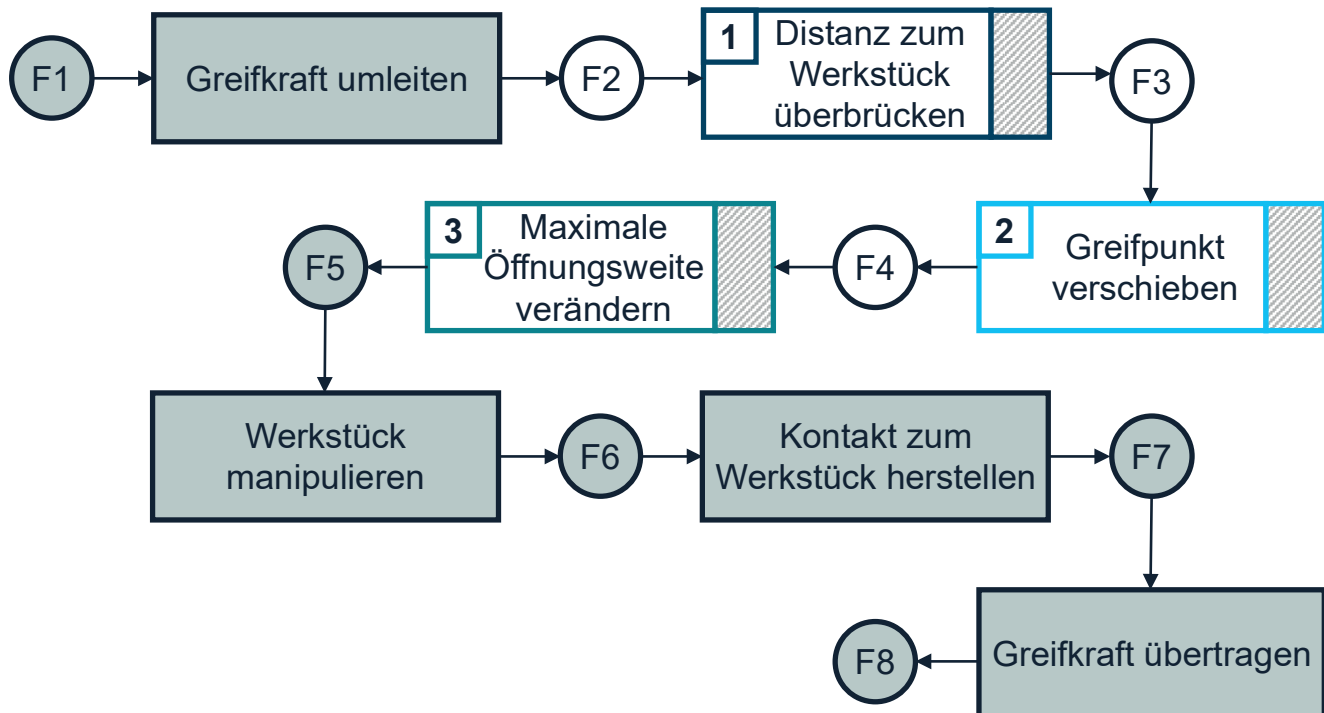


Abbildung 8-14: Umsatzorientierte Funktionsstruktur der Greiferfinger aus dem FiN-GERKIT-Baukasten (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 47))

Damit verschiebt sich die Wirkfläche des Fingers, was dem Unterscheidungsmerkmal „Auskrugung“ zugeordnet werden kann. Gleiches gilt für den Fall, dass der Abstand zwischen den Greifpunkten größer (oder kleiner) als der maximale (minimale) Abstand der Grundbacken ist. Dafür muss die maximale Öffnungsweite durch eine Auskrugung entlang der Greifachse verändert werden, was direkt mit dem Unterscheidungsmerkmal der maximalen Öffnungsweite zusammenhängt. Beim Schließen wird das Werkstück minimal manipuliert, bis der Kontakt mit der Wirkfläche hergestellt und die Greifkraft auf das Handhabungsobjekt übertragen wird (A_Meschter, 2021, S. 46f.). Diese Funktionen sind wiederum für alle Finger gleich und weisen daher keine Varianz auf. Für jede der drei identifizierten, varianten Funktionen kann eine Funktionskarte erstellt, und die Karten können zur zweiten Ebene des VAM zusammengeführt werden. Da die Varianz der Funktionen jeweils eindeutig auf ein einzelnes Unterscheidungsmerkmal zurückzuführen ist, erhalten die Funktionskarten die gleichen Farben wie die Unterscheidungsmerkmale, denen sie zuzuordnen sind (A_Meschter, 2021, S. 47).

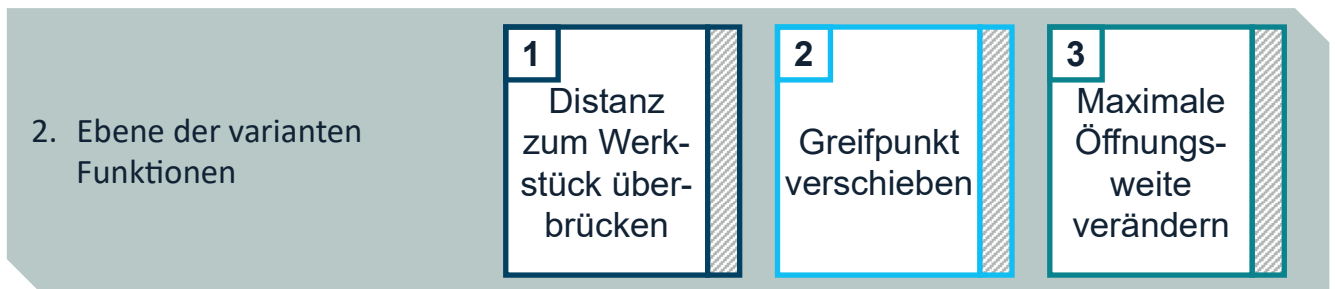


Abbildung 8-15: Funktionskarten auf der zweiten Ebene des VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 47))

8.2.5.3.3 Ebene der Wirkprinzipien

Auf der Ebene der Wirkprinzipien wird zwischen der Varianz ganzer Wirkprinzipien (am oberen Rand der Ebene) und der Varianz einzelner Wirkelemente (am unteren Rand der Ebene) unterschieden. Alle Fingervarianten des Fingerbaukastens FINGERKIT sind gleich hinsichtlich des Wirkprinzips Kraftschluss der Wirkbewegungen sowie des Werkstoffes. Je nach Modulauswahl ändert sich durch den Zusammenbau der gewählten Module die Gestalt der Greiferfinger, um die Distanz zwischen Greifergrundkörper und Werkstück zu überbrücken, das Werkstück zu manipulieren und die maximale Öffnungsweite zu verändern. Diese Karte auf der Ebene der Wirkelemente kann somit mehreren der zuvor genannten Funktionen zugeordnet werden. Der Abstand zwischen den Anschlussbohrungen zum Greifmodul und der Anschlussbohrung für die Fingermodule kann als weiteres variantes Wirkelement betrachtet werden, das sich durch die Verwendung verschiedener Basismodule ergibt (A_Meschter, 2021, S. 48).

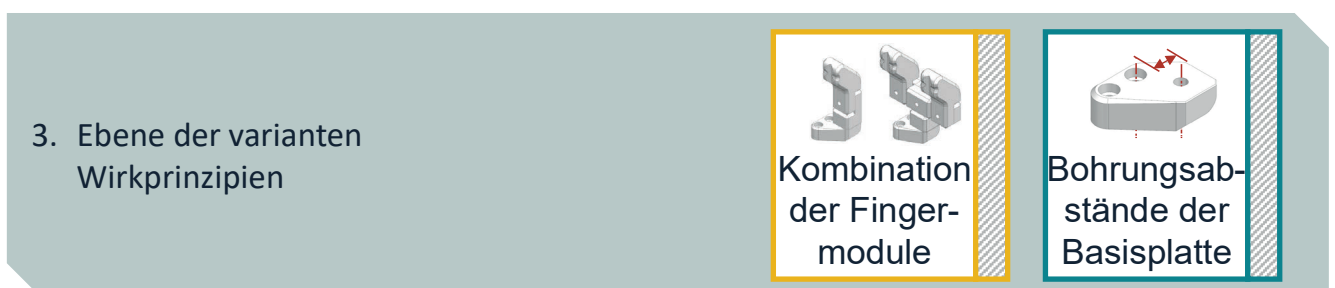


Abbildung 8-16: Karten für variante Wirkelemente bilden die dritte Ebene des VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 48))

Dies verändert schon bei geraden Fingern die Öffnungsweite und kann damit der entsprechenden Funktion zugeordnet werden. Die zwei Karten umfassen die Benennung, die farbliche Zuordnung zur Funktion bzw. dem Unterscheidungsmerkmal sowie eine Skizze des varianten Wirkelements (A_Meschter, 2021, S. 48).

8.2.5.3.4 Ebene der Komponenten

Die Varianz auf der Komponentenebene kann durch Betrachtung der dekomponierten Produkte ermittelt werden. In einem Module Interface Graph (MIG) werden alle Komponenten des Produktes mit ihrem Bauraum und ihrer ungefähren Lage im System sowie strukturellen Verbindungen und Flüssen zwischen den Komponenten dargestellt. Variante Elemente können kenntlich gemacht werden und die Anzahl der Schnittstellen und der Grad der Entkopplung können abgeschätzt werden (A_Meschter, 2021, S. 48). Die Modultypen Greifeinsatz (Fingerspitze) und Basisplatte sind variante Komponenten, die in jeder Variante in unterschiedlicher Ausprägung vorkommen. Die Modultypen Eckverbinder, Fingerelement, T-Element und Distanzstück stellen optionale Komponenten dar, die zur Fingergestaltanpassung verwendet werden können, aber nicht Teil jeder Variante sind.

Die varianten und optionalen Komponenten repräsentieren die Varianz auf dieser Ebene und erhalten daher Komponentenkarten auf der vierten Ebene des VAM (Abbildung 8-17).

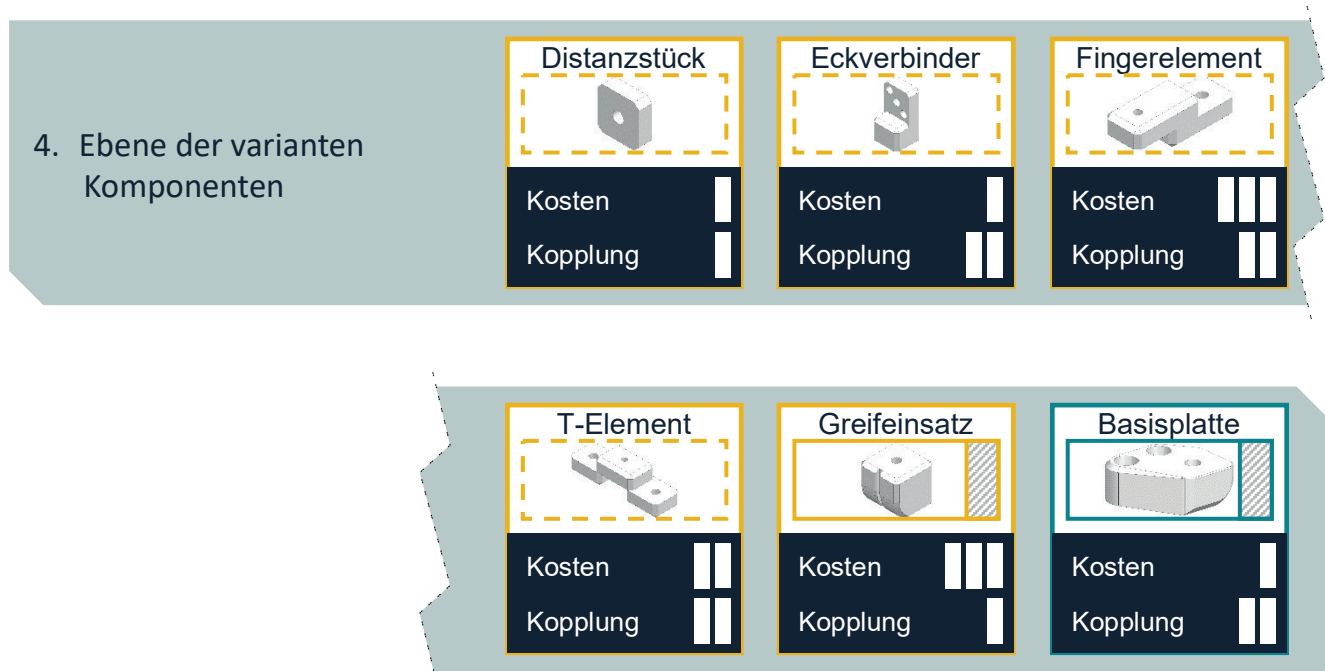


Abbildung 8-17: Komponentenkarten auf der vierten Ebene des VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 50))

Jede Komponentenkarte umfasst die Bezeichnung, die Kennzeichnung des Komponententyps sowie die Bewertung der Komponenten nach Kosten und Kopplung. Die

Bewertung der Kosten erfolgt anhand einer ABC-Analyse mit den folgenden Kategorien (A_Meschter, 2021, S. 50):

1. Erste Kategorie: **Geringe anteilige Kosten**
C-Teile: verursachen zusammen einen Anteil von 5 % der Produktkosten, machen etwa 50 % der Teile aus
2. Zweite Kategorie: **Mittlere anteilige Kosten**
B-Teile
3. Dritte Kategorie: **Hohe anteilige Kosten**
A-Teile: verursachen zusammen einen Anteil von etwa 80 % der Produktkosten, machen etwa 20 % der Teile aus

Da die Herstellkosten der Einzelmodule des FiNGERKIT unbekannt sind, wird die Komplexität und die Anzahl zur Bewertung genutzt. Dabei gilt, je komplexer eine Komponente, desto teurer die Herstellung. Der Greifeinsatz und das T-Element haben die höchste Komplexität, gefolgt von Fingerelement und Eckverbinder. Das Basiselement und das Distanzstück weisen die geringste Komplexität auf (A_Meschter, 2021, S. 50). Die Anzahl kann dem Standardumfang eines FiNGERKIT Startersets System 16 entnommen werden. Dieses umfasst vier Basisplatten in zwei Varianten, zwei Eckverbinder, ein Distanzstück, zwei Fingerelemente, ein T-Element und fünf Greifeinsätze in zwei Varianten. In einer Nutzwertanalyse (Tabelle 8-11) kann dann die Kosteneinteilung erfolgen. Da die Komplexität die Herstellkosten stärker beeinflusst als die geringen Stückzahlunterschiede im Starterset, wird die Komplexität mit 0,6 und die Anzahl mit 0,4 gewichtet.

Tabelle 8-11: Nutzwertanalyse zur Ermittlung der Komponentenkosten (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 51))

Bezeichnung	Komplexität	Anzahl	Nutzwert	Kategorie
	0,6	0,4		
Greifeinsatz	6	6	$0,6 \cdot 6 + 0,4 \cdot 6 = 6,0$	A
T-Element	5	2	3,8	B
Fingerelement	4	4	4,0	B
Eckverbinder	3	4	3,4	C
Basiselement	2	5	3,2	C
Distanzstück	1	2	1,4	C

Die zweite Kategorie auf den Karten bewertet die Kopplung, d.h. Anzahl und Standardisierungsgrad der Schnittstellen, gemäß folgender Einteilung (A_Meschter, 2021, S. 51):

1. Kategorie: **Weitestgehende Entkopplung**
Die Schnittstelle ist für alle Varianten vollständig definiert und standardisiert
2. Kategorie: **Geringe Kopplung**
Eine Komponente hat mehrere standardisierte Schnittstellen
3. Kategorie: **Starke Kopplung**
Mindestens eine Schnittstelle ist nicht vollständig standardisiert

Die Schnittstellen bei FiNGERKIT sind alle standardisiert. Die Module weisen lediglich ein oder zwei Schnittstellen auf. Daher werden die Module mit nur einer Schnittstelle der ersten und die mit mehreren Schnittstellen der zweiten Kategorie zugeordnet. Die so gebildeten sechs Karten bilden die vierte Ebene des VAM.

8.2.5.3.5 Das Variety Allocation Model

Das Verknüpfen der zuvor hergeleiteten vier Ebenen des VAM zeigt die interne und externe Vielfalt des Baukastens FiNGERKIT.

Die oberste Ebene der Unterscheidungsmerkmale zeigt die externe Vielfalt, während die Ebenen zwei bis vier die interne Vielfalt beschreiben. Wenn ein vom Anwender wahrgenommenes Unterscheidungsmerkmal die Varianz einer Funktion verursacht, werden die entsprechenden Karten von Unterscheidungsmerkmal und Funktion miteinander verbunden. Die Karte des Wirkprinzips, welches diese Funktion ermöglicht, wird mit der Funktionskarte verbunden. Dieses Prinzip kann auf allen Ebenen angewendet werden. Daraus ergibt sich das in Abbildung 8-18 dargestellte VAM. Deutlich wird hierbei, dass dieses VAM auf den ersten beiden Ebenen dem Idealbild entspricht und auf den unteren beiden Ebenen davon abweicht. Ziel ist es daher, durch alternative und variantengerechtere Lösungsansätze das ermittelte VAM zu erweitern und dem Idealbild weiter anzunähern.

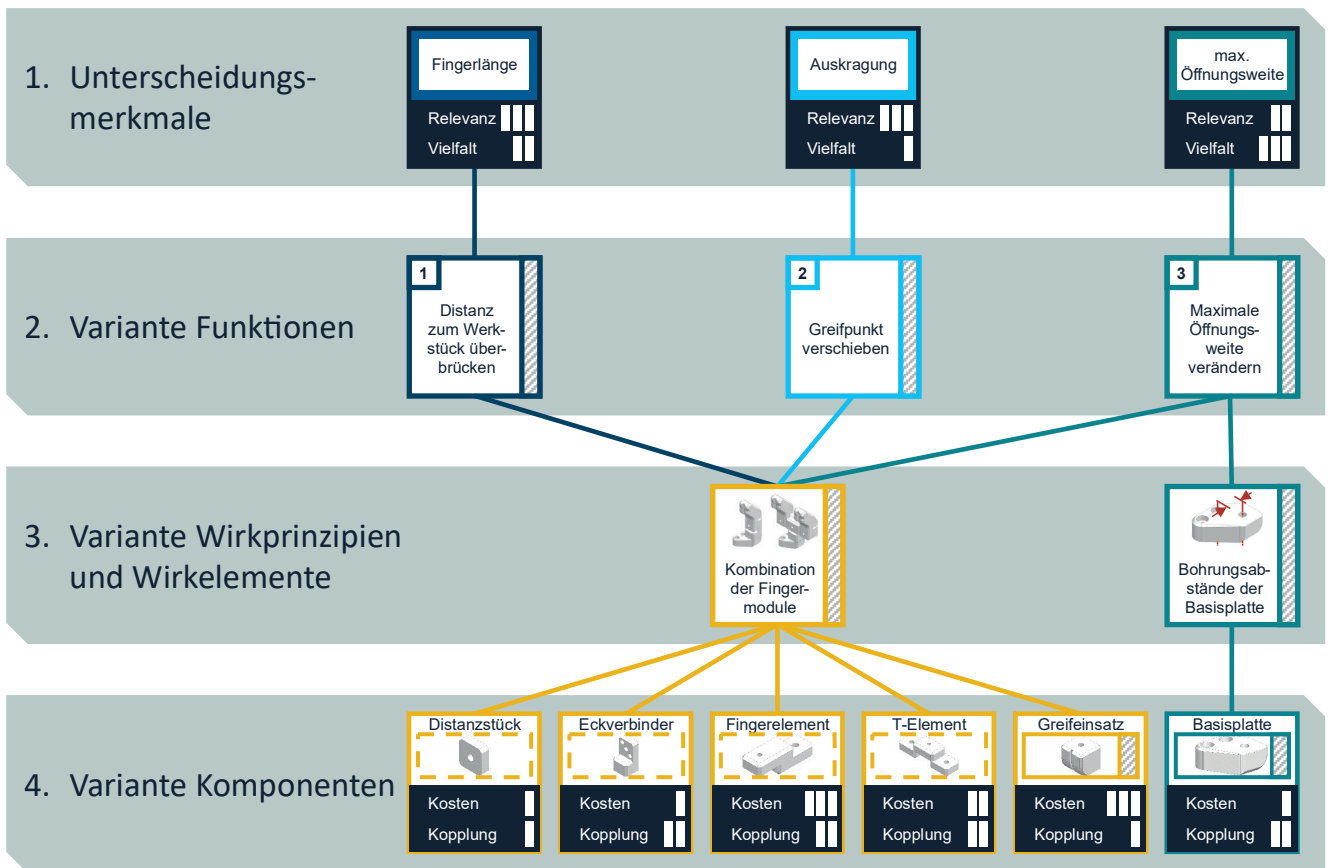


Abbildung 8-18: VAM des Weiss Robotics FiNGERKIT (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 51))

8.2.5.4 Suche nach alternativen variantengerechten Lösungsansätzen

Die ideale VAM-Struktur sieht eine Eins-zu-eins-Zuordnung zwischen Unterscheidungsmerkmal und Komponente über die Ebenen Funktionen und Wirkprinzipien/-elemente vor. Dies ist bei dem oben abgebildeten VAM noch nicht der Fall. Durch eine variantengerechtere Gestaltung kann eine Annäherung an das Idealbild erfolgen. Ergänzend zu den im bisherigen VAM aufgeführten Unterscheidungsmerkmalen, Funktionen, Wirkelementen und Komponenten, soll der zu entwickelnde Baukasten weitere Funktionen erfüllen, woraus sich wiederum neue Elemente auch auf den anderen Ebenen ergeben. Dafür wird das VAM angepasst, und danach werden Ebene für Ebene alternative Lösungen gesucht. Die Lösungssuche beginnt dabei auf der untersten Ebene, um iterative Anpassungen auf verschiedenen Ebenen zu vermeiden.

8.2.5.4.1 Anpassung des Variety Allocation Models

Während die Greifermodelle, die mit dem FiNGERKIT kompatibel sind, alle die gleiche Schnittstelle an den Grundbacken aufweisen, soll der zu entwickelnde Baukasten auch

für Modelle anderer Hersteller mit verschiedenen Schnittstellen geeignet sein. Da voraussichtlich nicht eine Basisplatte entwickelt werden kann, die alle Schnittstellen abdeckt und in die des Baukastens übersetzt, wird eine externe Vielfalt erzeugt. Gleiches gilt für die Wirkfläche am Greifeinsatz: Beide Greifeinsätze des FiNGERKIT haben prismatische Wirkflächen. Aufgrund der Vielfalt an Handhabungsaufgaben und -objekten soll der Baukasten auch über mehr Wirkflächen verfügen. Die Funktionsintegration kann, wie oben erwähnt, den Handhabungsoperationen den nicht wertschöpfenden Charakter nehmen. Daher sollen in den Baukasten auch Sensoren integriert werden. Auf der obersten Ebene werden drei weitere Karten ergänzt (A_Meschter, 2021, S. 54) (siehe Abbildung 8-19).

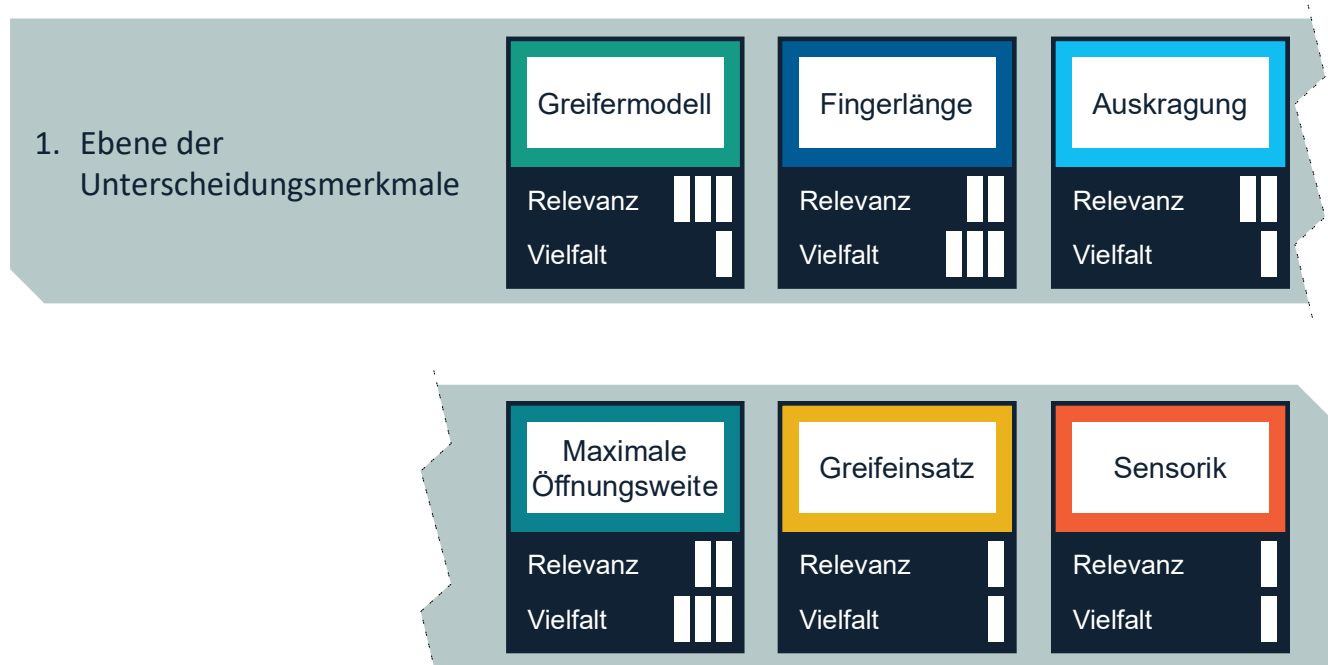


Abbildung 8-19: Ebene 1 mit ergänzten Unterscheidungsmerkmalen

Das dem Anwender zur Verfügung stehende Greifermodell entscheidet dabei maßgeblich über die Fingerkonfiguration, weshalb dieser Karte eine hohe Relevanz zugerechnet wird. Da aber Handhabungsoperationen auch ohne spezielle Wirkfläche und ohne Sensorik möglich sind, sind diese Merkmale von geringerer Relevanz. Da zunächst nur zwei Greifermodelle berücksichtigt werden und es vergleichsweise wenige mechatronische Greifer gibt, deren Anzahl aber stetig steigt, wird die Vielfalt der zweiten Kategorie zugeordnet. Gleiches gilt für das Merkmal der Auskrägung. Eine geringe Vielfalt weisen Greifeinsätze und Sensorik auf, die Fingerlänge und Öffnungsweite hingegen sollen möglichst variabel sein (A_Meschter, 2021, S. 54–55). Durch die geänderten Unterscheidungsmerkmale ergeben sich auf der zweiten Ebene neue Funktionen, die sich

auch in der umsatzorientierten Funktionsstruktur widerspiegeln und als neue Karten aufgenommen werden (Abbildung 8-20).

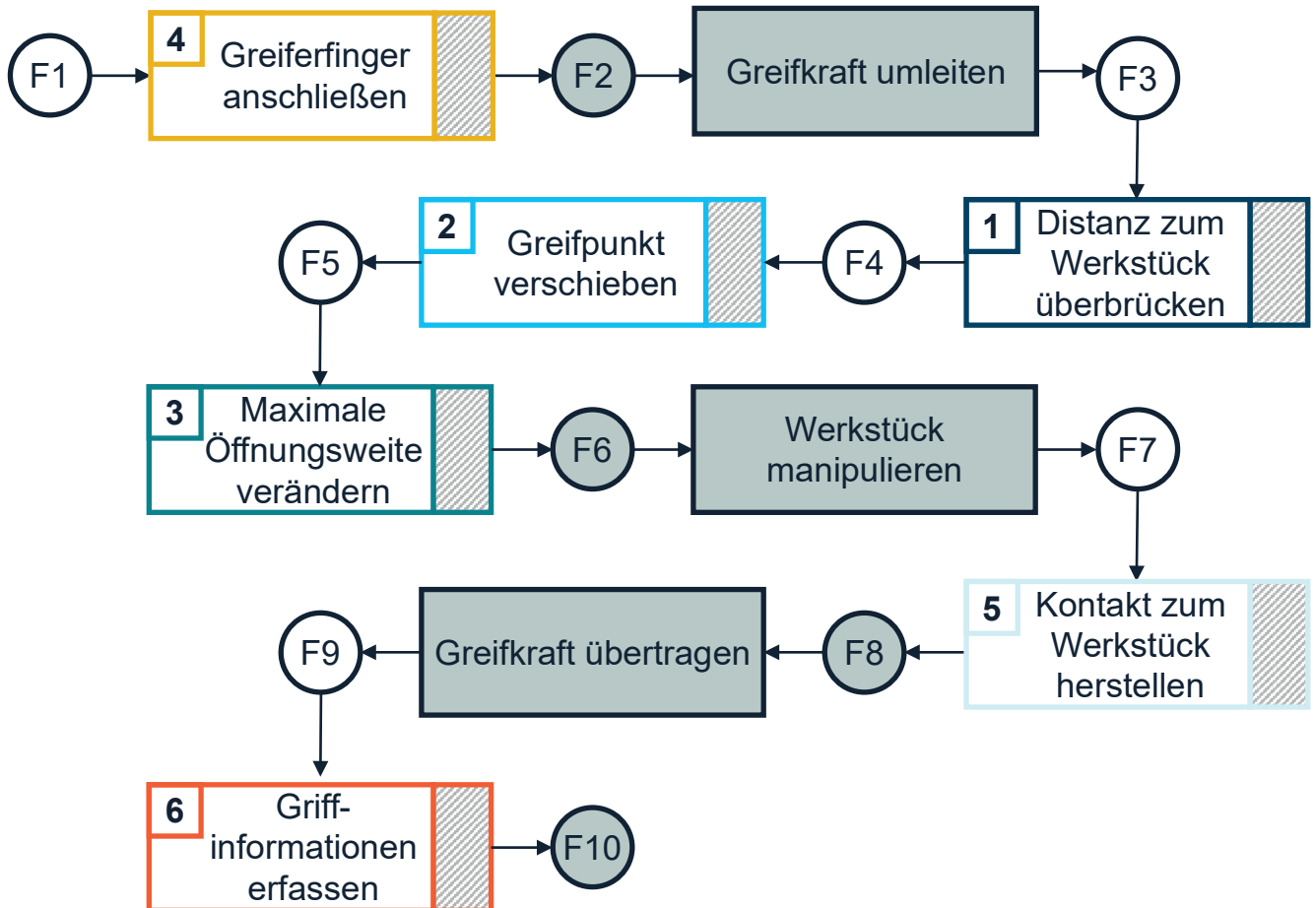


Abbildung 8-20: Umsatzorientierte Funktionsstruktur des neuen Baukastens VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 55))

Durch die Abhängigkeit der Ebenen ergeben sich aus den ergänzten Unterscheidungsmerkmalen neben neuen Funktionen auch neue Wirkprinzipien und neue Komponenten, die im VAM ergänzt werden (Abbildungen 8-21 - 8-23).

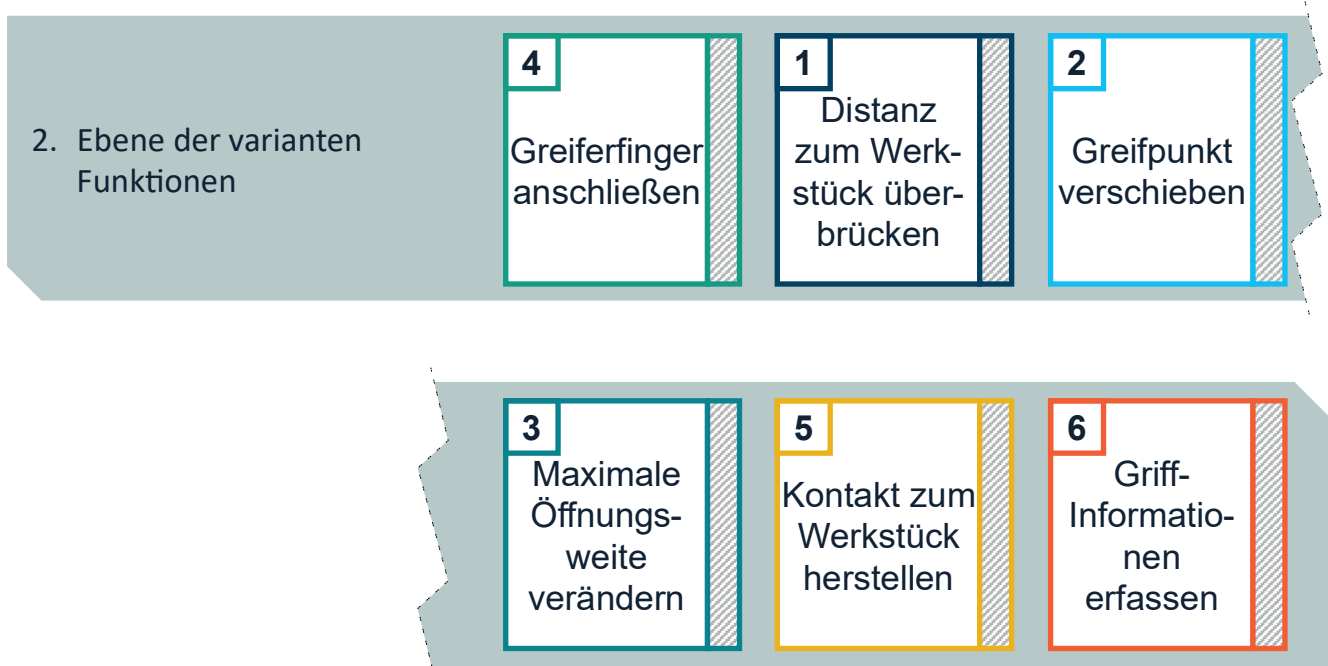


Abbildung 8-21: Ebene 2 mit ergänzten Funktionskarten VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 55–56))

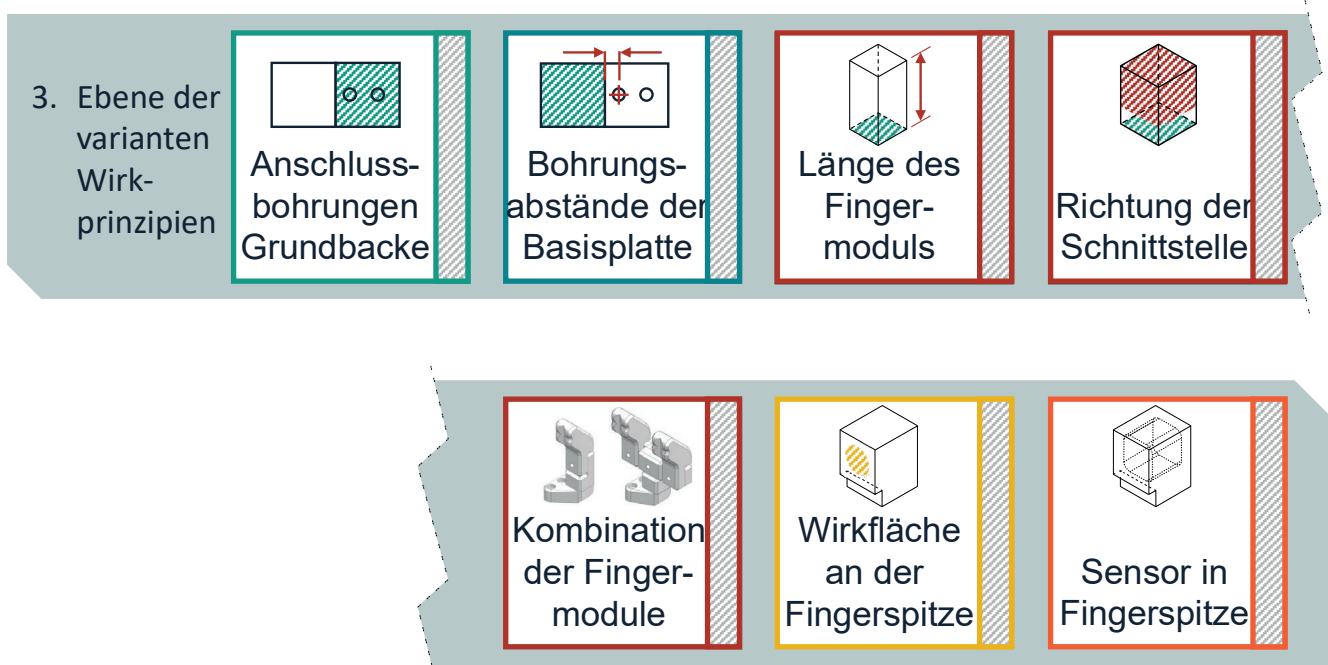


Abbildung 8-22: Ebene 3 mit ergänzten Wirkprinzipkarten VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 56))

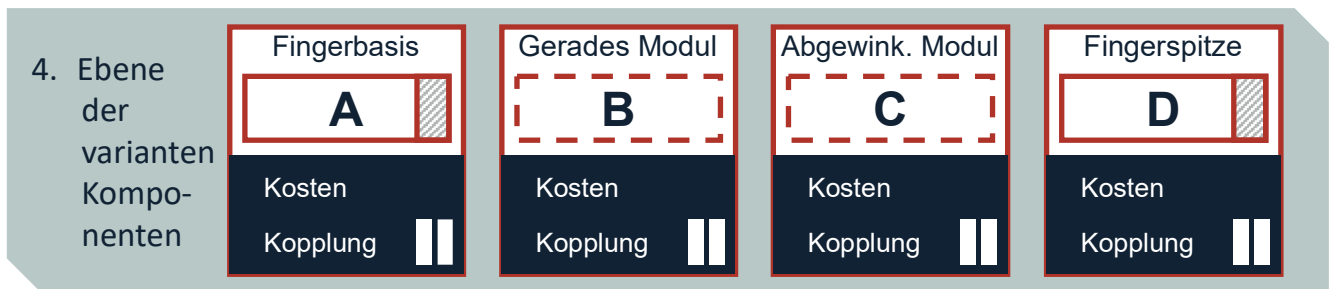


Abbildung 8-23: Ebene 4 mit ergänzten Komponentenkarten (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 57))

Das angepasste VAM entspricht auf den ersten beiden Ebenen dem Idealbild. Dies war zu erwarten, da die Modularisierung in Kapitel 8.2.3 funktionsorientiert erfolgt ist. Auf den unteren Ebenen ergibt sich Optimierungspotenzial, das im Folgenden durch variantengerechtere Lösungsansätze adressiert wird.

Auf der Ebene der Komponenten kann durch die Eliminierung der technischen Vielfalt, das Differenzieren oder Überdimensionieren ungünstiger varianter Komponenten oder der Integration varianter Komponenten die Variantengerechtigkeit gesteigert werden. Die technische Vielfalt kann nicht reduziert werden, da jede Komponente im VAM mindestens mit einem Unterscheidungsmerkmal verbunden ist (vgl. Kipp, 2012, S. 98). Durch die Differenzierung oder Überdimensionierung ungünstiger varianter Komponenten sollen diejenigen Komponenten neugestaltet werden, die hohe anteilige Kosten oder eine hohe Anzahl von Kopplungen aufweisen sowie diejenigen, die mehreren Unterscheidungsmerkmalen zugeordnet sind. Aufgrund der sehr ähnlichen Verwendung der Komponenten wird die Kopplung für alle in die gleiche Kategorie eingestuft und die bisher konzeptionelle Gestaltung der Module macht eine Kostenbewertung schwierig (s. Abbildung 8-23). Es wird daher geprüft, ob mit einer Differentialbauweise die Variantengerechtigkeit gesteigert werden kann. Dazu werden verschiedene Lösungsalternativen entwickelt und bewertet (Friedmann et al., 2022, S. 630; A_Meschter, 2021, S. 58–72), die in Anhang E beschrieben sind.

8.2.5.5 Zusammenfassung der gewählten Lösungskonzepte

Die gewählten Lösungskonzepte führen zu Veränderungen im VAM und zeigen die Veränderung hin zu einem variantengerechteren Gesamtprodukt.

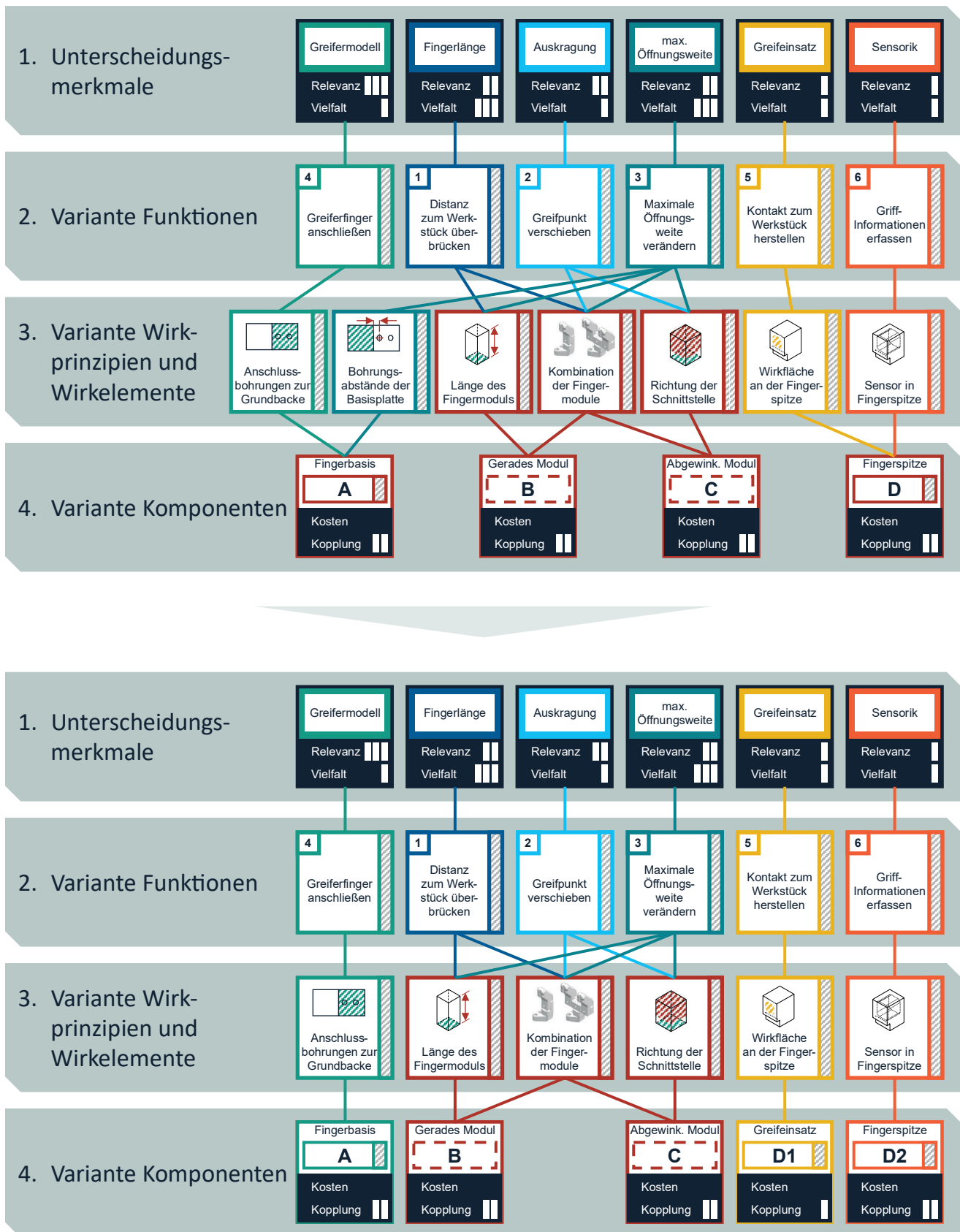


Abbildung 8-24: Vergleich des initialen mit dem optimierten VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 83))

Die Fingerbasis (Modultyp A) bleibt weiterhin eine Variantenkomponente, bei der es für jedes Greifermodell eine Variante gibt (*Lösungskonzept 1*). Der Abstand zwischen der Baukastenschnittstelle und dem Anschlussbild zur Grundbacke des Greifermoduls wird standardisiert, und die Karte *Bohrungsabstände* auf der Ebene der Wirkprinzipien entfällt. Das Unterscheidungsmerkmal Greifermodell mit der korrespondierenden Funktion, dem verbundenen Wirkelement sowie der varianten Komponente bleibt bestehen, sodass der Pfad der Eins-zu-Eins-Zuordnung entspricht. Aufgrund der Individualität von Handhabungsobjekten und ihrer Orientierung beim Greifen wird die Fingerspitze durch Differenzialbauweise in zwei Komponenten aufgeteilt. Die so neu entstandene Komponente *Greifeinsatz* beeinflusst mit dem Wirkelement *Wirkfläche* an der Fingerspitze die Funktion zum Herstellen des Kontakts zum Handhabungsobjekt. Die Komponente Fingerspitze wird in ihrer Gestalt standardisierter, sodass je nach Bedarf ein Sensor eingesetzt werden kann. Der Greifeinsatz ist über eine standardisierte Schnittstelle mit der Fingerspitze verbunden. Beide Pfade entsprechen der Eins-zu-Eins-Zuordnung und damit dem Idealzustand. Voraussetzung hierfür ist, dass der Greifeinsatz für die Verwendung mit verschiedenen Sensoren geeignet ist (A_Meschter, 2021, S. 82–84).

Bei den beiden verbliebenen Komponenten (Modultyp B und C) bleibt das VAM unverändert und der Idealzustand wird für die Unterscheidungsmerkmale *Fingerlänge*, *Auskrümmung* und *maximale Öffnungsweite* nicht erreicht. Das gerade Fingermodul wird gemäß *Lösungskonzept 8* als Baureihe mit den Längen 22 mm, 36 mm und 59 mm umgesetzt. Für das abgewinkelte Fingermodul wird für beide Richtungen entlang der Greifachse sowie für beide Richtungen senkrecht zur Greifachse jeweils eine Variante vorgesehen. Alle Varianten müssen jeweils zwei Mal pro Finger in den Baukasten aufgenommen werden. Die seitliche Schnittstelle dieser Module bildet die Schnittstelle zum nächsten Fingermodul (A_Meschter, 2021, S. 82–83). Die ausgewählten Lösungskonzepte werden im nächsten Schritt zusammengeführt und die einzelnen Module ausgestaltet.

8.2.6 Modulgestaltung

Zur Festlegung der Modulabmessungen müssen die beiden Schnittstellenarten festgelegt werden: Die elektrische Schnittstelle zwischen den Modulen wird mit Federkontaktpins umgesetzt. Um dabei auch bei einer Aufbiegung der Finger einen dauerhaften Kontakt der einzelnen Pins zu ermöglichen, sollte die elektrische Schnittstelle mittig in der Nähe der BSWS-Bolzen platziert sein. Im Sinne der geforderten Miniaturisierung

müssen die zehn Kontakte möglichst auf der vorhandenen Fläche des ausgewählten mechanischen Schnittstellenkonzepts untergebracht werden. Einreihige Kontaktleisten mit einem Rastermaß von 1,27 mm und einer Gesamtbreite von 13,08 mm können hierfür verwendet werden. Die gefederten Stifte haben einen maximalen Hub von 1,4 mm, sind bei maximal 2 A Dauerstrom für 100.000 Bewegungszyklen ausgelegt und für die Verwendung auf Leiterplatten geeignet (A_Schabel, 2021, S. 39–40). Die Platzierung der elektrischen Schnittstelle parallel zur Verbindungslinie ist für beide favorisierten mechanischen Schnittstellenkonzepte MSK 1 und MSK 3 möglich. Da MSK 1 aus Standardkomponenten besteht, wird zunächst nur dieses weiterverfolgt. Für eine einfache Montage und Demontage wird die Platine mit den Federstiftkontaktleisten parallel zur Verbindungslinie zwischen den beiden Bolzen der mechanischen Schnittstelle platziert und mit einem schraubbaren Deckel montiert (s. Abbildung 8-28).

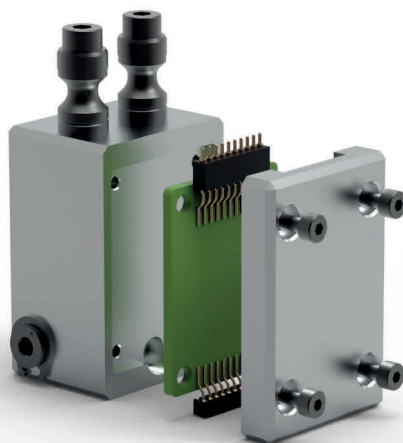


Abbildung 8-25: Explosionsansicht Modultyp B

Durch den Deckel verbreitert sich die Modulbreite und es ergibt sich ein quadratischer Modulquerschnitt mit einer Seitenlänge von 24,5 mm.

8.2.6.1 Modultyp A – Basismodul

Das Basismodul Typ A übersetzt die Schnittstelle des Greifers in die des Baukastens. Gemäß den Ergebnissen der variantengerechten Produktgestaltung bleibt dieser Modultyp eine Variantenkomponente bei der es für jedes Greifermodell eine Variante gibt. Abbildung 8-26 zeigt die Entwürfe der Basismodule für die beiden betrachteten Greifer. Auf der Oberseite befindet sich jeweils die Schnittstelle des Baukastens, bestehend aus dem BSWS-50 und einer männlichen Federkontaktleiste. Auf der Unterseite befindet sich die Anbindung zum Greifer, wobei die Variante für den EGL 90 auf die bestehende

Grundbacke geschraubt wird, während die Variante für den EGI 80 die bestehende Grundbacke ersetzt.

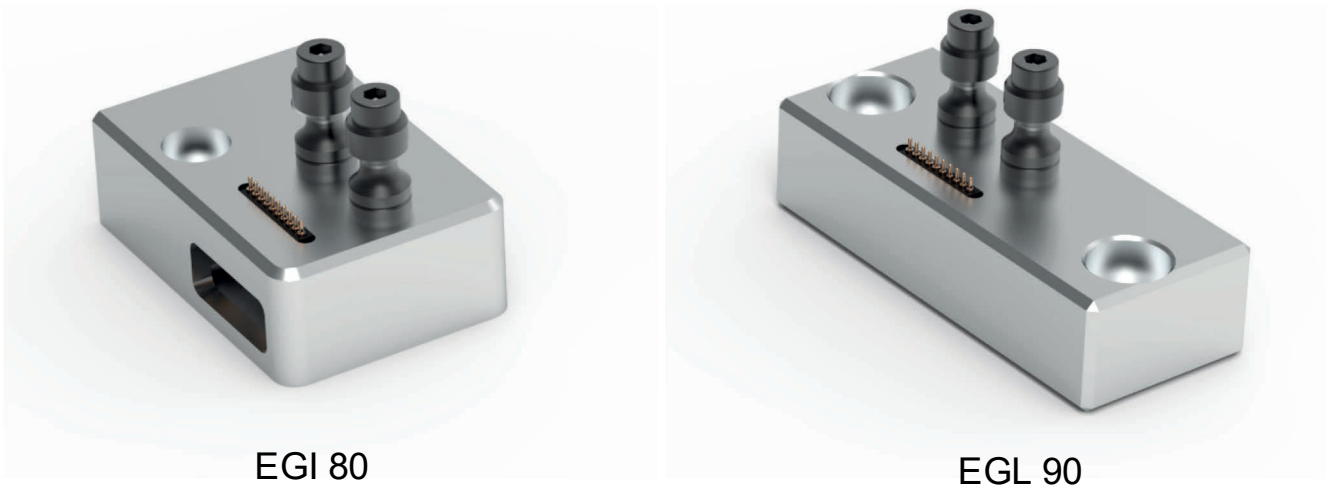


Abbildung 8-26: Modultyp A für die betrachteten Greifermodelle

Dies ist dem Konzept der elektrischen Schnittstelle zum Greifer geschuldet: Auf der Innenseite der Grundbacke des EGL 90 befinden sich Zähne für die translatorische Bewegung der Backe, die eine Kabeldurchführung an dieser Stelle verhindern.

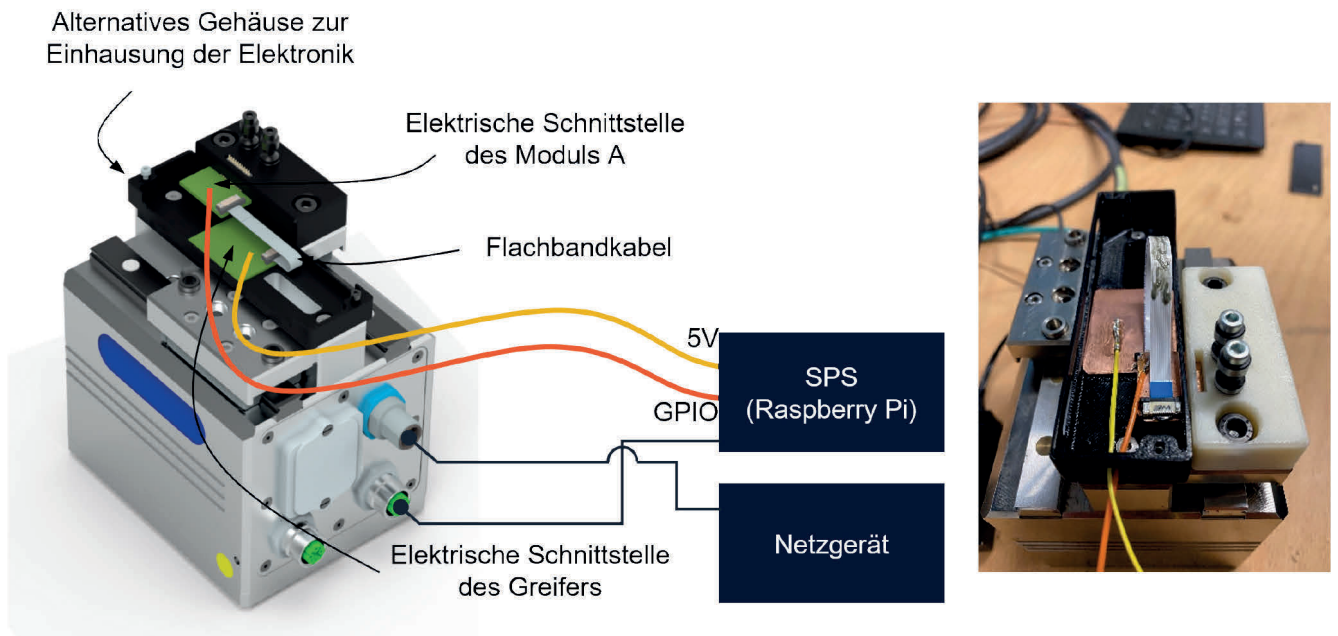


Abbildung 8-27: Versuchsaufbau zum Test der Schnittstelle zwischen Greifer und Grundbacke (eigene Darstellung mit Aufnahmen entnommen aus (A_Schabel, 2021))

Die elektrische Schnittstelle zum Greifer ist hier im Modell dargestellt und die Funktionsfähigkeit wurde in einem Versuch über 100.000 Greifzyklen erfolgreich getestet (s. Abbildung 8-27). Für eine tatsächliche Realisierung werden Änderungen am

Greifermodell notwendig, um Signale beispielsweise von Sensoren im Greifer verarbeiten zu können.

8.2.6.2 Modultyp B – Gerades Modul

Der Modultyp B hat eine Eingangs- und eine Ausgangsschnittstelle. Abbildung 8-25 zeigt ein beispielhaftes Modul in Explosionsansicht mit den Komponenten.



Abbildung 8-28: Varianten des Modultyp B

Der Modultyp wird, wie in Abbildung 8-28 zu sehen, in den Längen 22 mm, 36 mm und 59 mm realisiert, wobei die ersten beiden Längen zwei Mal und die letzte Länge einmal in den Baukasten aufgenommen werden (A_Meschter, 2021, S. 107).

8.2.6.3 Modultyp C – Abgewinkeltes Modul

Dieser Modultyp unterstützt eine Auskrägung in oder quer zur Greifrichtung. Für jede Richtung wird ein separates Modul vorgesehen. Es wird festgelegt, dass die Module C_1 und C_2 eine Auskrägung entlang der Greifachse und die Module C_3 und C_4 eine Auskrägung quer zur Greifachse ermöglichen.

Die Forderung des Greifens auf derselben Greifachse sowie die gegensätzliche Bewegungsrichtung der Greiferfinger haben Einfluss auf die Kombination und Verwendung der abgewinkelten Module. Um symmetrische Finger zu erreichen, muss jedem Modul das symmetrische Gegenstück zugewiesen werden. Hierbei ergeben sich Unterschiede zwischen den Greifermodellen, die bei der späteren Konfiguration beachtet werden müssen.

Die Modullänge wird durch die minimal benötigte Höhe bestimmt. Damit es keine Überschneidung zwischen den Modulkomponenten der Ein- und Ausgangsschnittstelle gibt, müssen diese neben bzw. übereinander platziert werden. Hierdurch ergibt sich eine minimale Länge von 36 mm, bestehend aus der Länge der Eingangsschnittstelle von 16 mm und 20 mm für die Breite der Ausgangsschnittstelle (s. Abbildung 8-29 a).

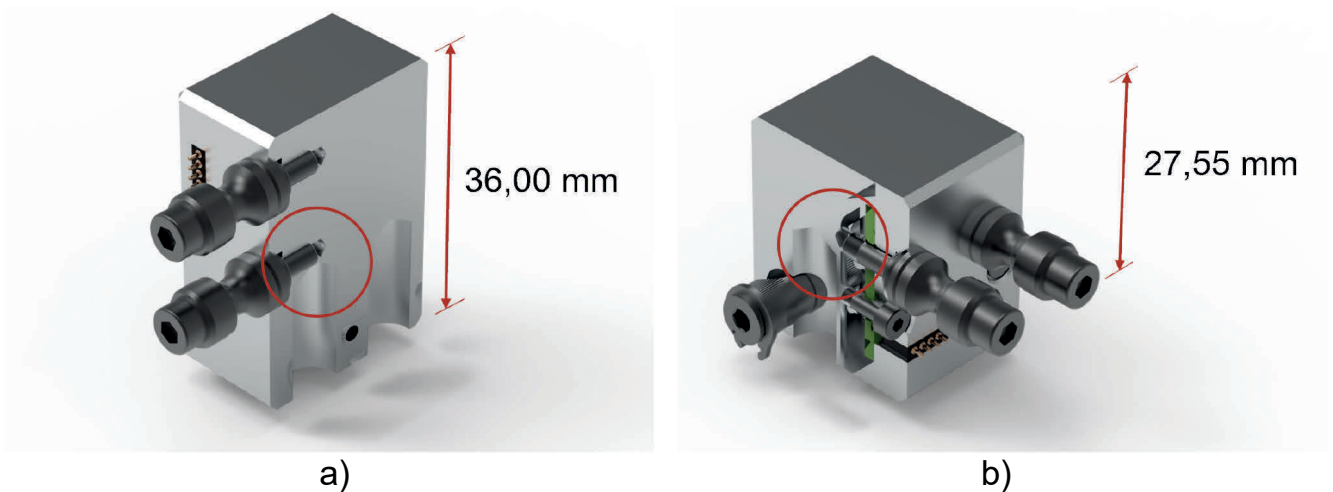


Abbildung 8-29: Platzverhältnisse innerhalb der abgewinkelten Module am Beispiel von Modultyp C_1 (a) und Modultyp C_3 (b)

Bedingt durch den seitlichen Versatz der Grundbacken beim SCHUNK EGL 90 müssen die Module C_3 und C_4 dazu genutzt werden, diesen Versatz auszugleichen, sodass beide Finger auf derselben Greifachse operieren. Aufgrund der Position der Ausgangsschnittstelle quer zur Eingangsschnittstelle kann die Modullänge auf die notwendigen 27,55 mm reduziert werden.

Um bei einer Auskrägung eine in positive z-Richtung zeigende Fingerspitze zu ermöglichen, müssen von jedem Modul dieses Typs jeweils 2 Stück in den Baukasten aufgenommen werden.

8.2.6.4 Modultyp D – Fingerspitze

Die Fingerspitze bildet das obere Ende des Fingers. Sie ist über eine standardisierte Schnittstelle mit dem Greifeinsatz verbunden und soll bei Bedarf einen Sensor aufnehmen.

Um die Austauschbarkeit der Sensorik in einem einheitlichen Fingerspitzengehäuse zu zeigen, werden ein Kraft- und ein Distanzsensor als Repräsentanten der am häufigsten in Greifern eingesetzten Sensoren (s. Kapitel 2.3.4.2) betrachtet. Der Kraftsensor ist ein in Zusammenarbeit mit SCHUNK entwickelter und im Patent US 12,097,612

(Friedrich, Friedmann & Fleischer, 2021) beschriebener Sensor, der die Stauchung einer Feder durch die einwirkende Kraft beim Greifen misst. Mittels magnetinduktiver Positionserfassung ermitteln zwei Hallsensoren die Stauchung der Feder anhand der Verschiebung eines Permanentmagneten entlang der Stauchungsrichtung. Die so beim Greifen auf das Handhabungsobjekt wirkende Kraft kann dann über die folgende Formel ermittelt werden:

$$F = c \cdot x$$

8-2

mit der Federkonstanten c und dem zurückgelegten Weg x

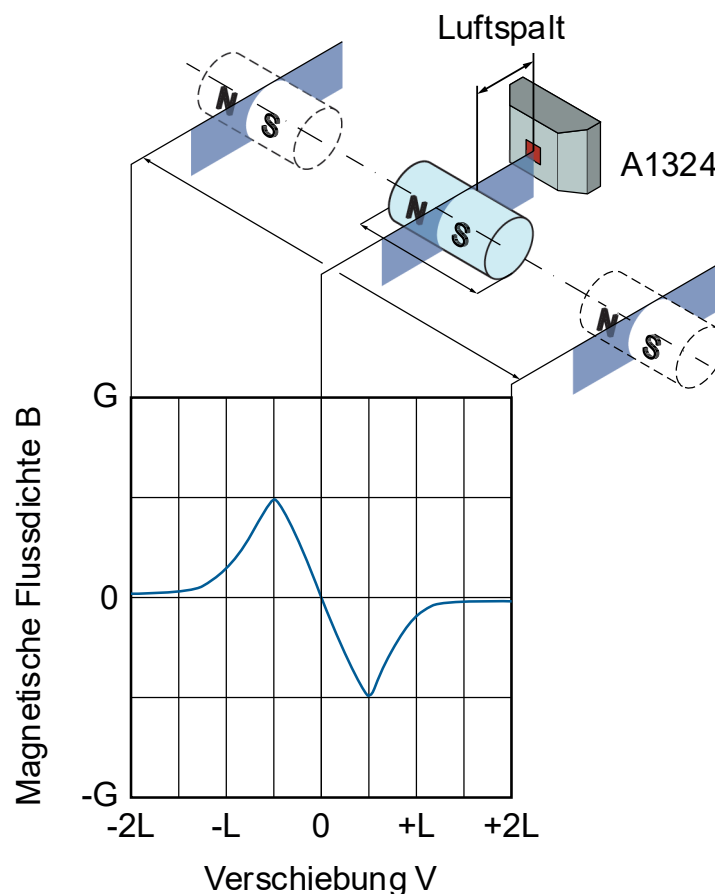


Abbildung 8-30: Verlauf der Magnetfeldstärke bei Positionsverschiebung des Dauermagneten (eigene und veränderte Darstellung nach (Foletto, Friedrich & Gupta, 2013, S. 1))

Mit der Auswahl der Feder kann somit der messbare Kraftbereich und die Auflösung der Messung angepasst werden. Die Hallsensoren messen die durch das Magnetfeld induzierte Spannung. Die Verwendung von zwei Hallsensoren nebeneinander ermöglicht einen größeren linearen Bereich des Sensorsignals. Die Sensoren müssen dazu

so zueinander positioniert werden, dass zwischen den zwei Signalkurven eine Phasenverschiebung von 90° erreicht wird. Abbildung 8-30 zeigt das Prinzip des Sensors.

Die simulative Untersuchung eines Ringmagneten bestätigt die Eignung dieses Magneten zur Verwendung in diesem Kraftsensor (A_Döhring, 2021, S. 70f.). Mit zunehmender Maximalkraft einer Feder sinkt die Genauigkeit. Für das kraftsensitive Greifen ist eine höhere Genauigkeit im niedrigen Greifkraftbereich erforderlich, weshalb eine Feder gewählt wird, die nicht den gesamten Kraftbereich der betrachteten Greifer abdeckt:

Tabelle 8-12: Technische Daten der Feder D-185K

Spezifikation	Wert
L_0 : Ungespannte Länge	$16,00 \pm 0,6$ mm
s_n : Größte Strecke	9,9 mm
D_e : Äußerer Wirkungsdurchmesser	$13,75 \pm 0,35$ mm
D_d : Dorndurchmesser	10,70 mm
F_n : Höchstkraft	$56,031 \pm 4,2$ N

Abbildung 8-31 zeigt eine Seitenansicht des Aufbaus.

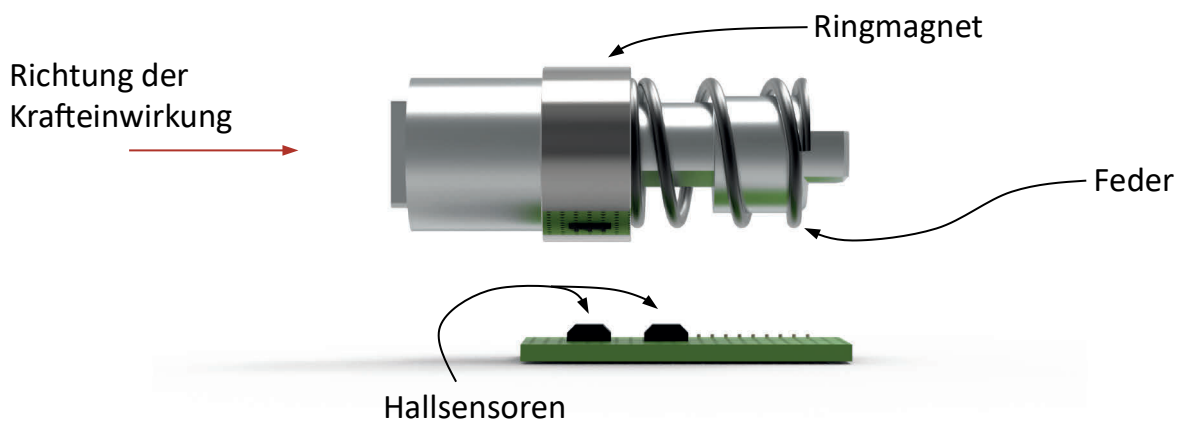


Abbildung 8-31: Aufbau des Kraftsensors

Die Führungswelle für Feder und Magnet wird mit der rückseitigen Gehäusewand verschraubt. Beide Sensoren werden auf einer Platine platziert, die im unteren Gehäusebereich untergebracht wird.

Als alternativer Sensor wird ein optischer Distanzsensor VL6180X verwendet, der nach dem Time-of-Flight (ToF)-Prinzip arbeitet, um die Entfernung zwischen dem Sensor und einem Objekt zu messen. Der Sensor misst absolute Werte bis zu einer Distanz von 100 mm und die Genauigkeit der Messung ist unabhängig von Farbe oder

Oberflächenstruktur des Objekts. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der benötigten Leitungen zur Spannungsversorgung und Signalübertragung für die beiden Sensoren. Die zehn vorgesehenen Leitungen sind damit ausreichend.

Tabelle 8-13: Übersicht zu den benötigten Leitungen der elektrischen Modulschnittstelle

#	Kraftsensor	Distanzsensor
1	Spannungsversorgung 5V	
2	GND	
3	Hall-Spannung U1	
4	Hall-Spannung U2	
5		SDA
6		SCL

Das Ergebnis der variantengerechten Produktgestaltung sieht ein einheitliches Fingerspitzengehäuse mit austauschbaren Sensoren vor. Die Integration der beiden Sensoren muss platzsparend erfolgen. Um die Störkontur des Fingers nicht unnötig zu vergrößern, muss die Breite der Fingerspitze der Modulbreite von 24,5 mm entsprechen. Die Kontaktierung der Sensoren in der Fingerspitze wird mit Hilfe einer einschiebbaren Steckerkombination realisiert. So werden die Federpins beim Wechseln der Sensoren nicht seitlich belastet (A_Döhring, 2021, S. 74). Die Abbildungen 8-32 und 8-33 zeigen eine Explosionsansicht der Fingerspitze mit jeweils einem Sensor.

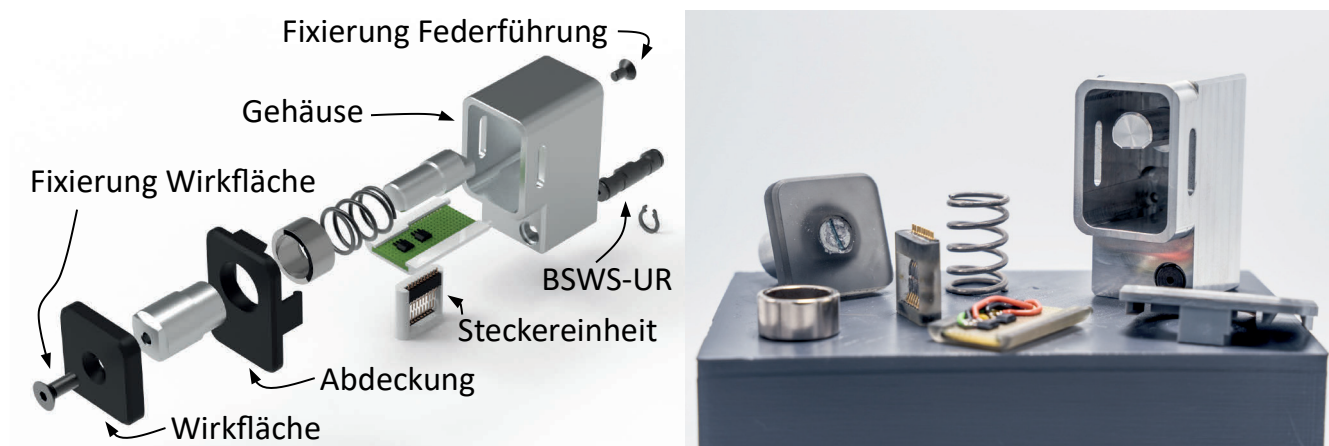


Abbildung 8-32: Explosionsansicht der Fingerspitze mit Kraftsensorik



Abbildung 8-33: Explosionsansicht der Fingerspitze mit Distanzsensorik

Der Sensorwechsel in der Fingerspitze erfolgt von der Wirkfläche des Greiferfingers aus. Gemäß den Anforderungen aus Abschnitt 8.2.2 muss die Wirkfläche zur Integration der Sensorik und zur Anpassung an die Greifaufgabe austauschbar sein. Zudem sollte sich die Größe der Wirkfläche nicht negativ auf die Störkontur des Fingers auswirken. Neben einer einfachen und schnellen Montage in Form weniger Teile, einem geringen Montageaufwand sowie einer kurzen Montagezeit, sollten die Wirkflächen eine hohe Wiederverwendbarkeit und eine geringe Wechselwirkung mit der Sensorik aufweisen. Daher wird die Wirkfläche als additiv gefertigtes Bauteil mit Schnapphaken gestaltet. Damit ist es möglich, nur einen kleinen Teil der Fingerspitze durch additive Fertigungsverfahren für eine Handhabungsaufgabe anzupassen. Durch eine Öffnung in der Wirkfläche kann der Stempel des Kraftsensors geführt werden, und der Distanzsensor kann Abstände erfassen (A_Döhring, 2021, S. 73).

Die folgende Abbildung 8-34 zeigt die mit den Hallensensoren erfasste Verschiebung des Magneten bei Kraffteinwirkung auf die Fingerspitze in einem Versuch. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8-35 dargestellt: Auf die Wirkfläche der fixierten Fingerspitze wird über eine M6-Schraube (Gewindesteigung 1 mm) eine Kraft aufgebracht. Nach jeweils zehn Sekunden wird die Schraube um eine vollständige Umdrehung weiter gedreht.

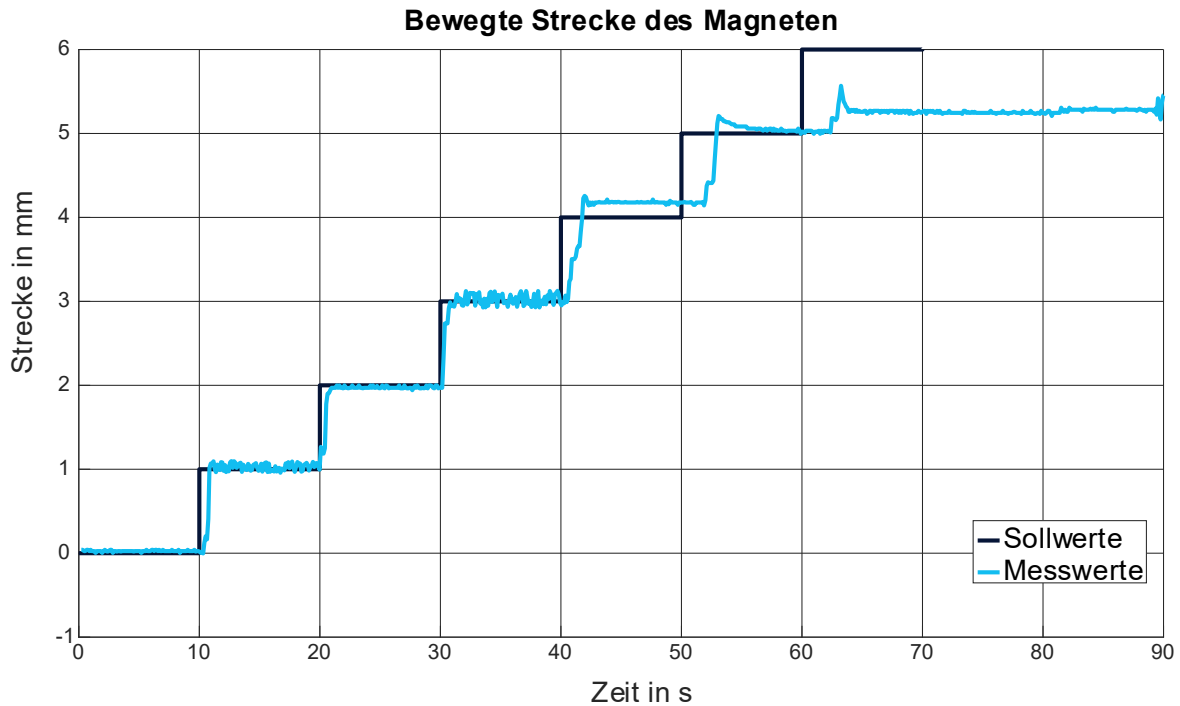


Abbildung 8-34: Aufgezeichnete Messwerte und Vergleich mit Sollwerten

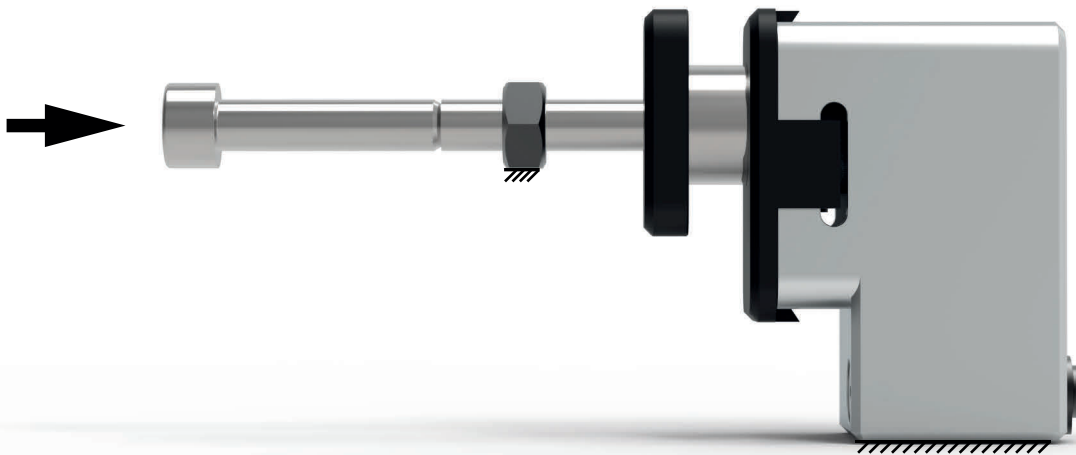


Abbildung 8-35: Versuchsaufbau zum Test des Kraftsensors in der Fingerspitze. Über eine fixierte Mutter wird eine M6 Schraube geschraubt. In vollen Umdrehungen verschiebt die Schraube die Wirkfläche der Fingerspitze entgegen der Feder. Der Magnet bewegt sich horizontal über die Hallsensoren

8.2.6.5 Baukastenübersicht

Mit Abschluss der Modulgestaltung besteht der Baukasten aus 26 Modulen, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind. Abbildung 8-36 zeigt ein Modul jeden Typs.

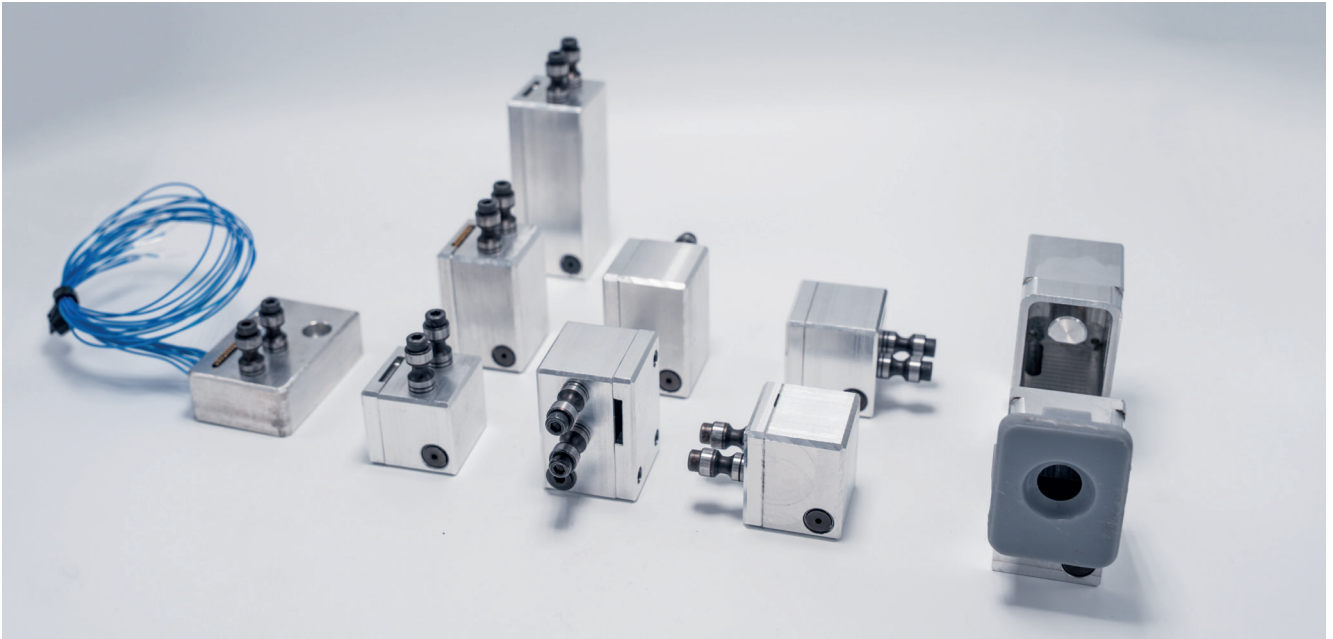


Abbildung 8-36: Überblick über die Module des Baukastens

Tabelle 8-14: Baukastenumfang bestehend aus 26 Modulen mit geometrischen Maßen und Angabe der enthaltenen Anzahl

Bezeichnung	Typ	Dimensionen			Anzahl
		Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	
A_1	Basis EGL 90	59,70	24,50	15,00	2
A_2	Basis EGI 80	45,50	30,00	15,00	2
B_1	gerade	24,50	24,50	27,55	4
B_2	gerade	24,50	24,50	36,00	4
B_3	gerade	24,50	24,50	59,00	2
C_1	abgewinkelt	24,50	24,50	36,00	2
C_2	abgewinkelt	24,50	24,50	36,00	2
C_3	abgewinkelt	24,50	24,50	27,55	2
C_4	abgewinkelt	24,50	24,50	27,55	2
D_K	Fingerspitze (Kraft)	47,94	24,50	48,00	2
D_A	Fingerspitze (Abstand)	36,00	24,50	48,00	2
					$\Sigma = 26$

8.3 Konfiguration

Für die Erprobung der Konfiguration werden die wichtigsten Bausteine informationstechnisch implementiert. Der Fokus liegt dabei auf der Bestimmung der Greifposition an verschiedenen Handhabungsobjekten, der Generierung der Fingerkonfiguration und der anschließenden Bewertung der ermittelten Konfigurationen ohne und mit Berücksichtigung einer Handhabungsobjektreihenfolge.

8.3.1 Softwaretechnische Umsetzung des Vorgehens

Die Applikation, die zur Erprobung der Konfiguration entwickelt wurde, besteht aus drei Modulen zur Greifpositionsbestimmung, Konfiguration der Finger und zur Bewertung der ermittelten Konfigurationen. Zugunsten einer breiten Anwendbarkeit und weiten Verbreitung wurde die Applikation in Python realisiert und nutzt im Hintergrund eine MySQL Datenbank zur Verwaltung der Daten.

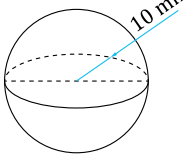
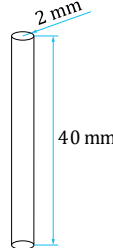
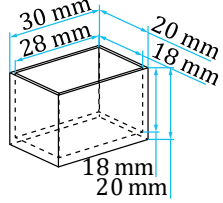
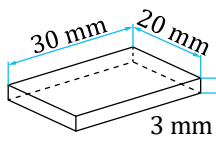
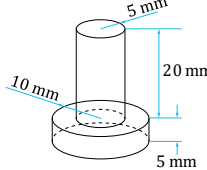
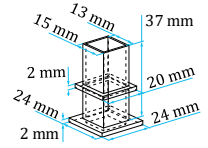
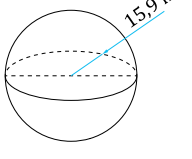
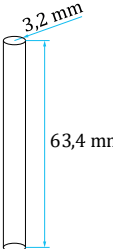
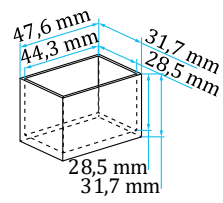
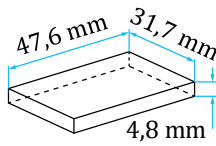
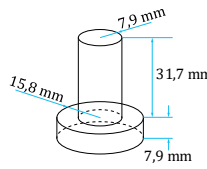
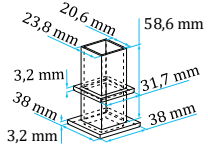
8.3.2 Handhabungsobjekte

Da das Handhabungsobjekt bei der Handhabung von zentraler Bedeutung ist, hat die Auswahl eines Handhabungsobjektspektrums bei der Erprobung Einfluss auf das Ergebnis. Es existiert kein Referenzteilespektrum, das zum Test von Handhabungssystemen oder -teilsystemen verwendet werden kann. Es wurde bereits mehrfach versucht, die Vielfalt an Handhabungsobjekten in Grundformen zu kategorisieren (z.B. Hesse, 2020, S. 41; Wolf & Schunk, 2016, S. 98), oder ein Bauteilspektrum zu definieren, welches repräsentativ für die Objektvielfalt in einem Bereich steht (z.B. Schmalz, 2018, S. 128–130). Jedoch sind die in der Literatur definierten Grundformen nicht näher beschrieben und die Ausprägungen der einzelnen Objekte nicht definiert, oder aber die bereits definierten Handhabungsobjektspektren beinhalten nur vergleichsweise einfache Geometrien, wie Zylinder und Quader.

Das Handhabungsobjektspektrum soll dazu verwendet werden, den entwickelten Baukasten zu validieren und die Vielfalt möglicher Fingervarianten bezüglich der Handhabung unterschiedlicher Werkstücke zu überprüfen. Es wird daher ein Teilespektrum definiert, das eine große Vielfalt an Handhabungsobjekten repräsentiert und sich dabei an den in der Literatur definierten Grundformen orientiert. Das Teilespektrum umfasst, gemäß den in (Wolf & Schunk, 2016) beschriebenen Grundformen Kugelteile, Zylinderteile, Hohlteile, Pilzteile und Flachteile sowie zum Leistungsvergleich mit der automatisierten Fingerkonstruktion nach (Schmalz, 2018) ein Werkstück, das sich in der Geometrie an einem Handhabungsobjekt in dieser Arbeit orientiert. Kugelförmige und zylinderförmige Objekte lassen sich durch eine entsprechende Gestaltung der Greiferfingerwirkfläche beim Greifen zentrieren und erlauben so eine Überprüfung der Wirkflächen-gestaltung. Da die Werkstücke im Rahmen der Fingerkonfiguration durch ihre konvexe Hülle beschrieben werden und bei der Greifpositionsbestimmung Außengriffe berücksichtigt werden, unterscheiden sich Hohlteile in ihrer Außenkontur nicht von den in (Wolf & Schunk, 2016) genannten Blockteilen. Bei einem kraftschlüssigen Griff jedoch muss

für ein Hohlteil ein Kompromiss zwischen Griffsicherheit und beschädigungsfreiem Greifen gemacht werden. Hohlteile können daher für die Untersuchung einer Funktionsintegration in Form einer Kraftsensorik verwendet werden. Die Realisierung von Auskragungen sowie die Forderung nach kurzen Fingern kann mit Hilfe von Flachteilen überprüft werden. Die Kollisionsfreiheit von Greiferfingern und Handhabungsobjekt bzw. zwischen Handhabungsobjekt und Greifer soll mit den Pilzteilen untersucht werden, die ähnliche Greifpositionen wie Zylinderteile aufweisen, aber über eine variable Störkontur verfügen. Alle sechs Handhabungsobjektarten werden in ihrer kleinsten Größe, wie in Tabelle 8-15 beschrieben, definiert und über sechs Größenstufen gemäß der geometrischen Normzahlreihe mit dem Skalierungsfaktor 1,585 skaliert (Friedmann et al., 2023, S. 5; A_Klüpfel, 2021, S. 74–75).

Tabelle 8-15: Handhabungsobjektspektrum

Kugel	Zylinder	Hohlteil	Flachteil	Pilzteil	Schmalz
 <p>10 mm</p>	 <p>2 mm 40 mm</p>	 <p>30 mm 28 mm 20 mm 18 mm 18 mm 20 mm</p>	 <p>30 mm 20 mm 3 mm</p>	 <p>5 mm 20 mm 10 mm 5 mm</p>	 <p>15 mm 13 mm 37 mm 2 mm 20 mm 24 mm 2 mm</p>
Kugel 1	Zylinder 1	Hohlteil 1	Flachteil 1	Pilzteil 1	Schmalz 1
 <p>15.9 mm</p>	 <p>3.2 mm 63.4 mm</p>	 <p>47.6 mm 44.3 mm 31.7 mm 28.5 mm 28.5 mm 31.7 mm</p>	 <p>47.6 mm 31.7 mm 4.8 mm</p>	 <p>7.9 mm 31.7 mm 15.8 mm 7.9 mm</p>	 <p>23.8 mm 20.6 mm 58.6 mm 3.2 mm 31.7 mm 38 mm 3.2 mm</p>
Kugel 2	Zylinder 2	Hohlteil 2	Flachteil 2	Pilzteil 2	Schmalz 2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Kugel 7	Zylinder 7	Hohlteil 7	Flachteil 7	Pilzteil 7	Schmalz 2

8.3.3 Erprobung der Greifpositionsbestimmung

Mit Hilfe des definierten Handhabungsobjekt-Spektrums kann die Funktionsweise der Greifpositionsbestimmung erprobt werden.

Für jedes Handhabungsobjekt werden die besten fünf Greifpositionen ermittelt und visualisiert. Dabei wird der in der folgenden Tabelle 8-16 dargestellte Datensatz für jedes Handhabungsobjekt ermittelt.

Tabelle 8-16: Greifpunktesatz für das Objekt Pilzteil 5

#	Greifpunkt 1		Greifpunkt 2		Greif- fläche	Bewer- tung
1	$\begin{pmatrix} 2,076 \\ 0 \\ 0,587 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2,076 \\ 157,790 \\ 0,587 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	157,790 mm	0,761
2	$\begin{pmatrix} 0,624 \\ -1,678 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,624 \\ -1,678 \\ 157,782 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	157,782 mm	0,753
3	$\begin{pmatrix} -0,510 \\ -4,161 \\ 157,782 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0,510 \\ -4,161 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	157,782 mm	0,750
4	$\begin{pmatrix} -0,828 \\ 63,097 \\ 131,624 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_1 = \begin{pmatrix} 0,018 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0,827 \\ -63,097 \\ 131,624 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_2 = \begin{pmatrix} 0,018 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	126,194 mm	0,623
5	$\begin{pmatrix} 17,909 \\ 60,487 \\ 132,510 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_1 = \begin{pmatrix} 0,302 \\ 0,953 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -17,909 \\ -60,485 \\ 132,510 \end{pmatrix}$	$\vec{n}_2 = \begin{pmatrix} -0,268 \\ 0,964 \\ 0 \end{pmatrix}$	126,164 mm	0,622

Bezogen auf das Objektkoordinatensystem werden die Position der Greifpunkte und die Flächennormalenvektoren an diesen Punkten ermittelt. Die Annäherungsrichtung der Greiferfinger erfolgt dann entgegengesetzt zur Richtung der Normalenvektoren. Zusätzlich wird die Größe der möglichen Greiffläche rund um die Greifpunkte und die Bewertungszahl ermittelt.

Die folgenden Abbildung 8-37 a-f zeigen die Greifpositionen beispielhaft für je ein Objekt jeder Handhabungsobjektart des betrachteten Handhabungsobjektspektrums.

Alle Lösungen sind gültig und auch für Handhabungsobjekte außerhalb des Spektrums können Greifpositionen gefunden werden. Auch die maximale Öffnungsweite der Greifer wird bei der Bewertung berücksichtigt. So liegen die Greifpositionen für alle Größenstufen des Handhabungsobjekts Flachteil an sehr ähnlichen Positionen. In der größten Ausführung jedoch liegen die Greifpositionen nur noch auf zwei Flächen, da die anderen mit den betrachteten Greifern (in diesem Fall dem SCHUNK EGI 80) nicht mehr erreicht werden können.

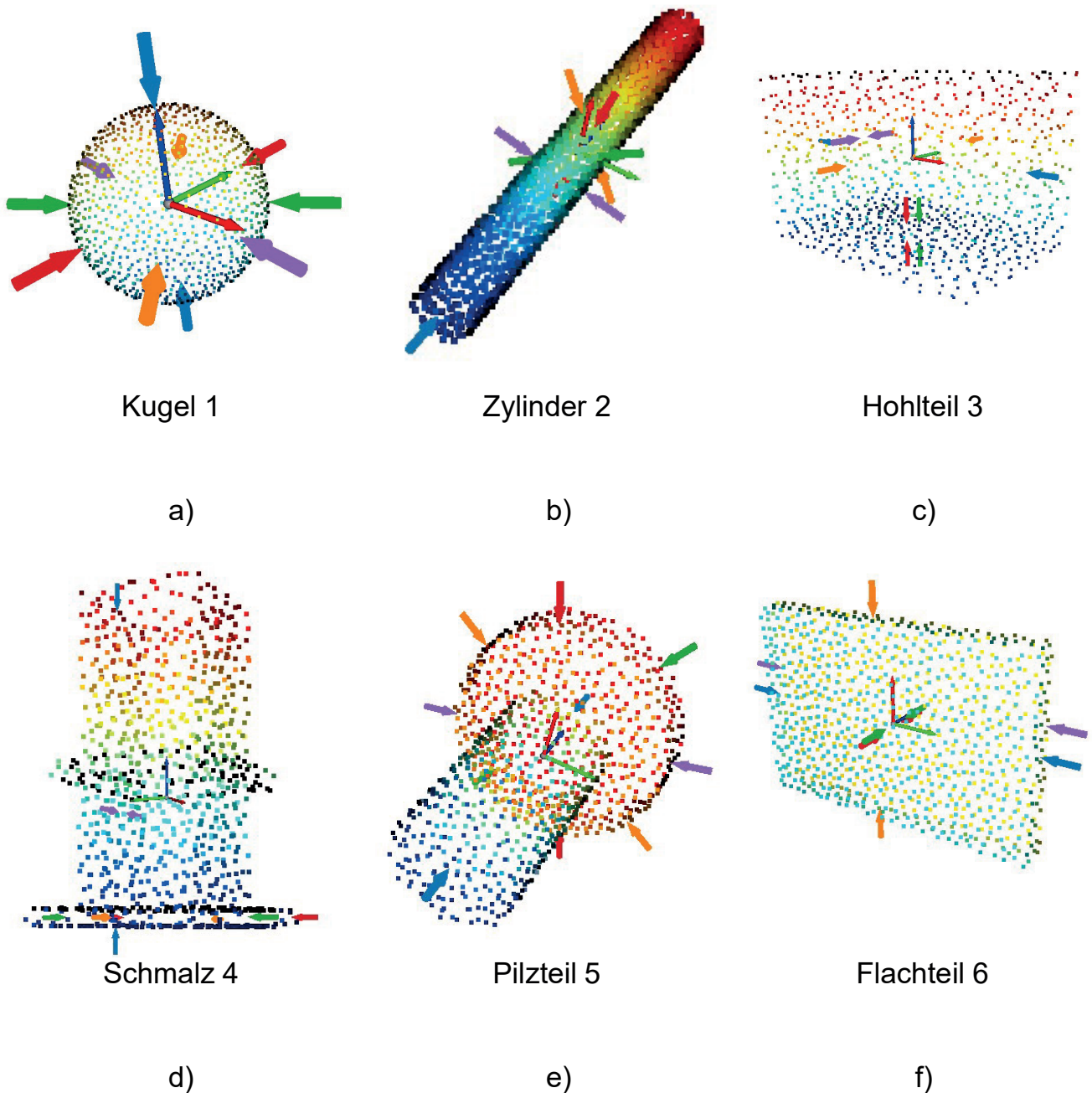


Abbildung 8-37: Visualisierung der fünf besten Greifpositionen an unterschiedlichen Seiten für je ein Objekt des Handhabungsobjektspektrums

8.3.4 Erprobung der Konfiguration

Mit dem realisierten Baukasten ändert sich die in Kapitel 6.3 angenommene Anzahl an frei konfigurierbaren Modulen. Mit neun frei kombinierbaren Modulen ergeben sich die in Tabelle 8-17 genannten Kombinationsmöglichkeiten.

Nach Elimination redundanter Kombinationen und unter Berücksichtigung variabler Modulanzahlen kann der Umfang der kombinatorischen Aufgabenstellung auf 253.534 unterschiedliche Konfigurationen reduziert werden (A_Klüpfel, 2021, S. 27).

Tabelle 8-17: Anzahl möglicher Kombinationen bei der Konfiguration der Greiferfinger

k	N (mit Redundanz)
2	1
3	10
4	72
5	504
6	3.024
7	15.120
8	60.480
9	181.444
10	362.880
11	362.880

Die softwareseitige Umsetzung der Konfigurationslogik entspricht dem in Abbildung 6-13 dargestellten Ablauf. Das Einlesen und Abspeichern von Zwischenwerten erfolgt im XLSX-Format (Excel Spreadsheet). Ergebnisse werden in der zu Beginn dieses Kapitels genannten SQL-Datenbank gespeichert. Dieses Datenhaltungskonzept dient einem modularen Aufbau und ermöglicht in der Erprobung eine einfache Änderung z.B. des Baukastenumfangs. Tabelle 8-18 zeigt beispielhaft die Bereitstellung der Module für die Konfiguration.

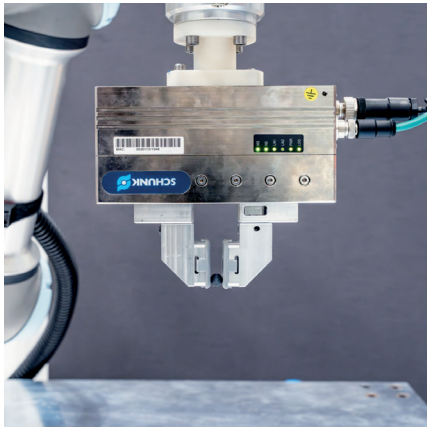
Tabelle 8-18: Bereitstellung der Baukastenmodule

Modul	A 1	B 1	C 1	C 3	D 1	D 2	D 3
Breite (x-Richtung)	45,50	24,50	24,50	24,50	24,50	24,50	47,63
Breite (y-Richtung)	59,70	24,50	24,50	24,50	24,50	36,00	24,50
Höhe (z-Richtung)	15,00	27,55	36,00	27,55	15,00	33,00	33,00
Position der Outputschnittstelle	x	0,00	0,00	0,00	12,25	0,00	0,00
	y	-10,50	0,00	-12,25	0,00	0,00	-23,75
	z	15,00	27,55	23,75	15,30	15,00	16,50
Kontur	X _{min}	-22,75	-12,25	-12,25	-12,25	-12,25	-12,25
	X _{max}	22,75	12,25	12,25	12,25	12,25	12,25
	y _{min}	-29,85	-12,25	-12,25	-12,25	-12,25	-23,75
	y _{max}	29,85	12,25	12,25	12,25	12,25	12,25
	Z _{min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z _{max}	15,00	27,55	36,00	27,55	15,00	33,00
Rotationsmatrix	Zeile 1	1,0,0	1,0,0	1,0,0	0,0,1	1,0,0	1,0,0
	Zeile 2	0,1,0	0,1,0	0,0,-1	0,1,0	0,1,0	0,0,-1
	Zeile 3	0,0,1	0,0,1	0,1,0	-1,0,0	0,0,1	0,1,0
Anzahl	2	2	2	2	2	2	2

Für die Konfiguration von Fingern aus den Modulen werden der Modultyp, die Modulgeometrie und die Verfügbarkeit der Module übergeben. Die Fingerspitze als Modultyp D wird in zwei Module zerlegt, um die Querschnittsänderung der Fingerspitze abbilden zu können. „D_1“ bezeichnet dabei den unteren Teil der Fingerspitze mit der Eingangsschnittstelle, während „D_2“ und „D_3“ die Fingerspitzenvarianten mit Außenfase und für den Kraftsensor bezeichnen (A_Klüpfel, 2021, S. 64).

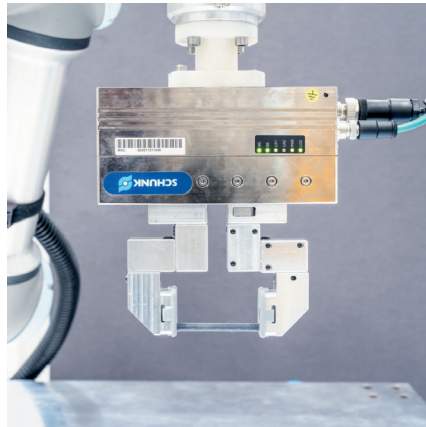
Zur Sicherstellung der Konsistenz des Lösungsraums werden zunächst alle zulässigen Konfigurationen aller Objekte des Handhabungsobjektspektrums jeweils in einer Tabelle gespeichert. Zu den gespeicherten Informationen zählen die Modulabfolge für den linken und rechten Greiferfinger sowie die vollständigen, geometrischen Informationen zur Evaluierung der Fingergestalt. So ergeben sich beispielsweise für die Handhabungsobjekte „Flachteil_1“ 201 gültige Konfigurationen, für das Handhabungsobjekt „Schmalz_4“ ergeben sich 348 Konfigurationen. Anhand der Tabellen ist bereits ersichtlich, wie flexibel eine Fingerkonfiguration ist, da die gleiche Konfiguration bei mehreren Werkstücken ermittelt werden kann.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Fingerkonfigurationen für jeweils ein Objekt des Handhabungsobjektspektrum in einer Größenstufe.



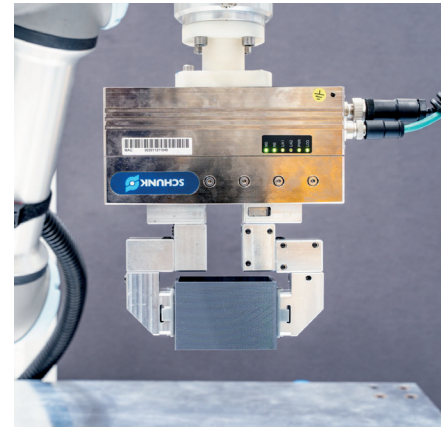
Kugel 1

a)



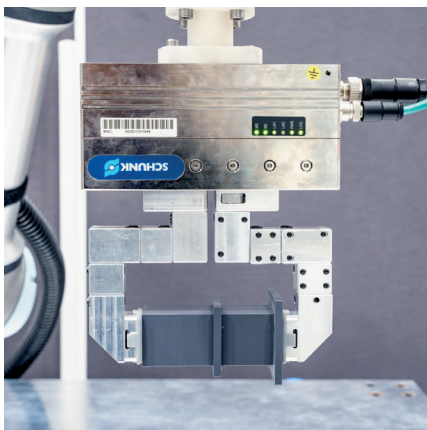
Zylinder 2

b)



Hohlteil 3

c)



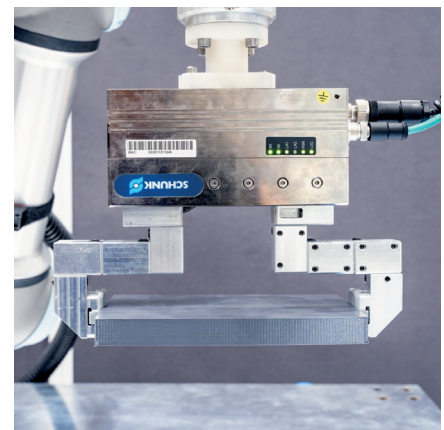
Schmalz 4

d)



Pilzteil 4

e)



Flachteil 5

f)

Abbildung 8-38: Beispielhafte Konfigurationen für je ein Objekt je Handhabungsobjekttyp des Handhabungsobjektspektrums

8.4 Erprobung der Konfigurationsbewertung

Die Bewertung einzelner Konfigurationen erfolgt anhand der in Kapitel 7.1 festgelegten Bewertungskriterien Fingerlänge, Auskragung, Flexibilität, Modulanzahl und Taktzeit. Um den Erfüllungsgrad eines Kriteriums zu quantifizieren, muss der gesamte Wertebereich noch linear in fünf Intervalle unterteilt werden.

Tabelle 8-19: Quantifizierung der Wertebereiche zur Ermittlung des Erfüllungsgrades (A_Klüpfel, 2021, S. 61)

Fingerlänge	Flexibilität	Taktzeit	Modulanzahl	Auskragung	Erfüllungsgrad
Intervall in mm	Intervall in %	Intervall in mm	Intervall in St.	Intervall in mm	
]162,5; 200]	[0; 20]	]46; 57,5]	[9; 11]	]120; 150]	1
]125; 162,5]	]20; 40]	]34,5; 46]	]7; 9]	]90; 120]	2
]87,5; 125]	]40; 60]	]23; 34,5]	]5; 7]	]60; 90]	3
]50; 87,5]	]60; 80]	]11,5; 23]	]3; 5]	]30; 60]	4
[0; 50]	]80; 100]	[0; 11,5]	[0; 3]	[0; 30]	5

Die Wertebereiche für die betrachteten Greifer lauten wie folgt:

- Fingerlänge: [0 mm; 200 mm]
- Flexibilität: [0 %; 100 %]
- Taktzeit: [0 mm; 57,5 mm]
- Modulanzahl: [0; 11]
- Auskragung: [0 mm; 150 mm]

Die Quantifizierung der Wertebereiche der einzelnen Kriterien ist in Tabelle 8-19 aufgeführt.

Für die Objekte des Handhabungsobjektspektrums können die ermittelten gültigen Konfigurationen mit den quantifizierten Kriterien und dem in Formel 7-1 beschriebenen Nutzwert bewertet werden. Die folgende Abbildung 8-39 zeigt beispielhaft drei Konfigurationen für das Handhabungsobjekt „Hohlteil_3“ mit dem Greifer EGI 80.

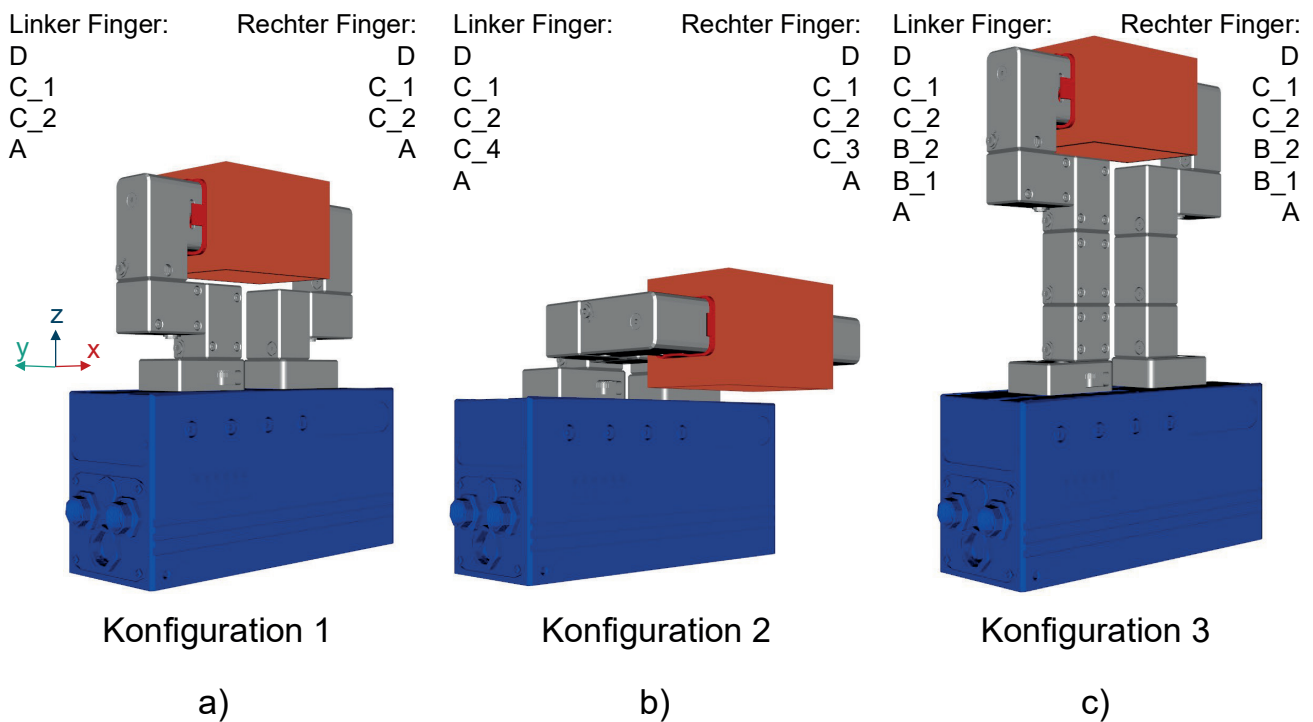


Abbildung 8-39: Exemplarisches, visuelles Ergebnis der Nutzwertanalyse am Beispiel von drei Fingerkonfigurationen für das Handhabungsobjekt „Hohlteil_3“

Die zugehörige Bewertung ist in Tabelle 8-20 dargestellt.

Tabelle 8-20: Exemplarisches Bewertungsergebnis der Nutzwertanalyse am Beispiel der oben dargestellten drei Fingerkonfigurationen für das Handhabungsobjekt „Hohlteil_3“

		Konfiguration 1			Konfiguration 2			Konfiguration 3		
Kriterien	Gewichtung	Wert	Bewertung	Teilnutzen	Wert	Bewertung	Teilnutzen	Wert	Bewertung	Teilnutzen
		Fingerlänge	0,30	83,10	4	1,20	30,90	5	1,50	146,73	3	0,90
Flexibilität	0,30	1,00	5	1,50	1,00	5	1,50	1,00	5	1,50
Modulanzahl	0,05	4	4	0,20	5	4	0,20	6	3	0,15
Taktzeit	0,05	29,87	3	0,15	29,87	3	0,15	29,87	3	0,15
Auskragung	0,30	0,00	5	1,50	79,80	3	0,90	0,00	5	1,50
Gesamtnutzen				4,55			4,25			4,20
Rang				1			2			3

Konfiguration 1 erhält die höchste Bewertung aufgrund der vergleichsweise kurzen Finger, der fehlenden seitlichen Auskragung und der Verwendung von nur wenigen Modulen. Konfiguration 2 hat eine nicht benötigte seitliche Auskragung und verwendet ein

Modul mehr pro Finger. Konfiguration 3 erhält vor allem aufgrund der nicht benötigten langen Finger eine geringe Bewertung. Die Bewertung der Flexibilität ist in dieser Betrachtung ausgeklammert. Sie beträgt bei allen Konfigurationen 100 %, da nur ein Handhabungsobjekt betrachtet wird.

Zur Erprobung der Konfiguration bei mehreren Handhabungsobjekten muss zunächst der Rekonfigurationsaufwand bestimmt werden. Anhand eines Demonstrators, der in Abbildung 8-41 dargestellt ist, können die Zeiten für die Rekonfiguration ermittelt werden. Der Demonstrator besteht aus einem Gestell, auf dem ein sechssachsiger Vertikalknickarmroboter der Firma Universal Robot (UR5e) mit einer Nennlast von 5 Kilogramm (Nr. 1 in Abbildung 8-41) montiert sind. Vor dem Handhabungsgerät befindet sich eine T-Nutenplatte (3), an der am vorderen Tischrand jeweils zwei Speicher für die Module (4) befestigt sind. Zwischen den Modulspeichern befindet sich eine Werkzeugkiste (5) für den Anwender. Der verwendete Greifer SCHUNK EGI 80 (2) befindet sich in Abbildung 8-41 in der Rekonfigurationsposition (A_Frech, 2023, S. 37).



Abbildung 8-40: Handhabungsversuch mit der in der Konfiguration ermittelten besten Konfiguration für das Handhabungsobjekt „Hohlteil_3“

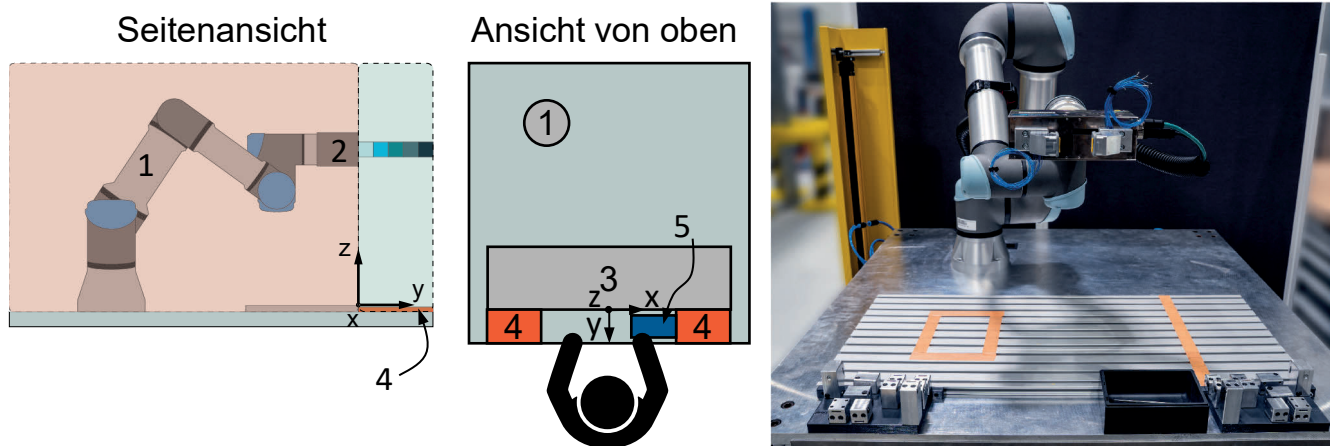


Abbildung 8-41: Demonstratoraufbau bestehend aus Roboter, Greifer, T-Nutenplatte, Modulspeicher und Werkzeugkiste

Tabelle 8-21: Basisbewegungen des Teilschrittes „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 40)

#	Basisbewegung	Körperteil	Handhabendes Objekt
1	Hinlangen	Linke Hand	
2	Greifen	Linke Hand	Modul
3	Bringen	Linke Hand	Modul
4	Fügen	Linke Hand	Modul
5	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
6	Fügen	Rechte Hand	Werkzeug
7	Drehen	Rechte Hand	Werkzeug
8	Loslassen	Linke Hand	Modul
9	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
9	Bringen	Linke Hand	

Tabelle 8-22: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 41)

#	Basisbewegung	Distanz x [mm]	Distanz y [mm]	Distanz z [mm]	Gesamtdistanz [mm]	Codierung
1	Hinlangen	18,0	107,0	0,0	108,5	A
2	Greifen					G1C1
3	Bringen	289,0	20,0	40,0	493,9	A
4	Fügen					P1
5	Bringen	318,0	85,0	40,0	518,0	A
6	Fügen					P3
7	Drehen					T-L
8	Loslassen					RL1
9	Bringen	318,0	85,0	40,0	518,0	A
9	Bringen	316,0	88,0	40,0	517,3	A

Mit der Lage der Komponenten am Demonstrator können die vier Teilschritte „Öffnen der Kette“, „Montage eines Moduls“, „Demontage eines Moduls“ und „Schließen der Kette“ in Basisbewegungen zerlegt und codiert werden. Die Tabellen 8-21 und 8-22 zeigen die Ergebnisse für den Teilschritt „Montage eines Moduls“, die Ergebnisse der anderen Teilschritte sind in Anhang F dokumentiert.

Anhand der Basisbewegungen und unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren kann eine Zeitbestimmung für die jeweiligen Teilschritte erfolgen. Um die berechneten Zeiten zu validieren, wurde eine Versuchsreihe durchgeführt. Jeder Teilschritt wurde dabei jeweils drei Mal durchgeführt, die Zeiten dokumentiert und der Mittelwert berechnet. Tabelle 8-23 zeigt die Ergebnisse:

Tabelle 8-23: Validierungsergebnisse der MTM-Analyse (A_Frech, 2023, S. 43)

Art der Erfassung	Öffnen der Kette	Montage eines Moduls	Demontage eines Moduls	Schließen der Kette
Versuch	4,746 s	4,875 s	4,001 s	4,801 s
MTM-Analyse	4,899 s	5,112 s	4,201 s	4,640 s
Abweichung	3,12 %	4,64 %	4,76 %	3,47 %

Da alle Abweichungen im niedrigen Prozentbereich liegen, sind die Teilschritte richtig erfasst. Mit dem zuvor definierten Baukastenumfang und dem hier ermittelten Rekonfigurationsaufwand kann das Intervall für die Bewertung definiert werden.

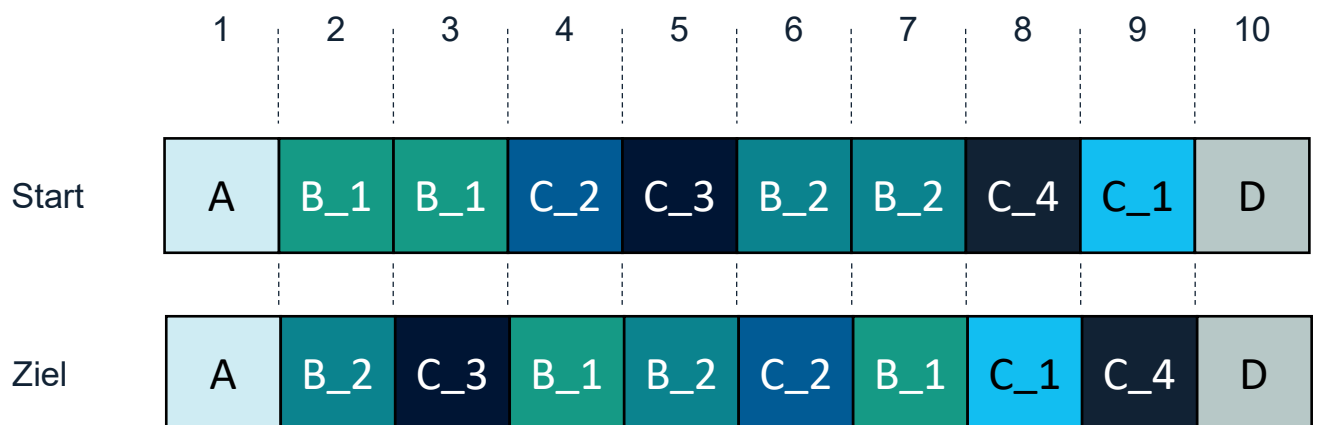


Abbildung 8-42: Beispielhafte Rekonfigurationsaufgabe mit maximaler Modulanzahl und ohne gleichbleibende Modulsequenzen (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 54))

Die untere Wertebereichsgrenze liegt bei Null für den Fall, dass zwei Handhabungsobjekte mit der gleichen Konfiguration gegriffen werden können und daher keine Rekonfiguration notwendig ist. Der maximale Rekonfigurationsaufwand entsteht, wenn jedes

Modul einer Konfiguration, bestehend aus der Maximalanzahl an Modulen pro Finger, ausgetauscht werden muss (A_Frech, 2023, S. 53f.). Abbildung 8-42 zeigt ein solches Beispiel für den EGI 80.

Es können sowohl in der Start- als auch in der Zielkonfiguration keine Modulsequenzen zusammengefasst werden. k_{SZS} und k_{SZE} sind jeweils 10. Der Maximalaufwand setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 8-24: Maximaler Rekonfigurationsaufwand für die vier Teilschritte

	Öffnen der Kette	Demontage	Montage	Schließen der Kette	Σ [TMU]
Dauer [TMU]	136,10	142,00	116,7	128,9	
Anzahl	1	8	8	1	
Gesamtdauer	136,10	1.136,00	933,60	128,90	2334,60

Damit ist die obere Grenze des Wertebereichs festgelegt. Der Wertebereich, in dem alle Rekonfigurationsaufwände für den Greifer EGI 80 bei der originalen Baukastenzusammensetzung liegen, ist das Intervall $[0,00; 2334,60]$. Das Intervall ist in TMUs angegeben. Der ermittelte Wertebereich kann nun ebenfalls diskretisiert werden, um bei der Betrachtung mehrerer Handhabungsobjekte einen kombinierten Nutzwert aus Rekonfigurationsaufwand und Fingerqualitätsnutzwert zu ermitteln.

Gemäß Formel 7-2 gibt es für eine maximale Modulanzahl von $k = 10$ in einer Konfiguration $N_{Gesamt} = 100$ Möglichkeiten womit sich die Auflösung des Wertebereichs nach Formel 7-3 zu $\Delta x = 0,04$ ergibt (A_Frech, 2023, S. 55).

Wie oben erwähnt, können für ein Handhabungsobjekt mehrere hundert gültige Konfigurationen ermittelt werden. Das Berechnen der Rekonfigurationsaufwände für den Umbau aus jeder Konfiguration des einen Objekts in jede Konfiguration eines anderen Objekts ist damit sehr umfangreich und damit auch sehr zeitintensiv. Da sich aber der Rekonfigurationsaufwand einer Montage oder Demontage einmal bestimmt nicht mehr ändert, können die Rekonfigurationsaufwände für ein festgelegtes Handhabungsobjektspektrum und einen definierten Baukastenumfang vorab ermittelt werden. Dazu werden die Nutzwerte für die Rekonfiguration von einer Konfiguration des einen Handhabungsobjekts in eine Konfiguration eines anderen Handhabungsobjekts in einer $m \times n$ -Matrix nach folgendem Schema abgelegt:

Tabelle 8-25: Formatierung der Matrizen für die Rekonfigurationsaufwände zwischen Handhabungsobjekt 1 und Handhabungsobjekt 2

		Handhabungsobjekt 2		
		Konfiguration 1	Konfiguration 2	...
Handhabungsobjekt 1	Konfiguration 1	$R_{Rekonfig.,H_1K_1H_2K_1}$	$R_{Rekonfig.,H_1K_1H_2K_2}$	...
	Konfiguration 2	$R_{Rekonfig.,H_1K_2H_2K_1}$	$R_{Rekonfig.,H_1K_2H_2K_2}$	...

Die Bezeichnung $R_{Rekonfig.,H_1K_1H_2K_1}$ steht dabei für den Rekonfigurationsaufwand, der entsteht, wenn die Konfiguration 1 für das Handhabungsobjekt 1 auf die Konfiguration 1 des Handhabungsobjektes 2 umgebaut wird.

Mit den für das Handhabungsobjektspektrum ermittelten Rekonfigurationsmatrizen können dann für verschiedene Handhabungsobjektfolgen und verschiedene Gewichtungen die bestbewerteten Konfigurationsreihenfolgen ermittelt werden.

Für die Erprobung der Ermittlung der minimalen Anzahl notwendiger Greiferfingerkonfigurationen für eine festgelegte Anzahl an Handhabungsobjekten wird die bei der Erprobung der Greifpositionsermittlung betrachtete Handhabungsobjektreihenfolge Kugel_1, Zylinderteil_2, Hohlteil_3, Schmalz_4, Pilzteil_5 und Flachteil_6 betrachtet.

Werden die Handhabungsobjekte einzeln betrachtet, so sind die folgenden Fingerkonfigurationen für den jeweils rechten Finger ideal:

Tabelle 8-26: Ideale Greiferfingerkonfigurationen bei unabhängiger Betrachtung der Handhabungsobjekte

	Kugel 1	Zylinderteil 2	Hohlteil 3	Schmalz 4	Pilzteil 5	Flachteil 6
Bewertung	3,70	3,60	3,65	3,65	3,70	3,40
Modul 1	A	A	A	A	A	A
Modul 2	D	C_2	C_2	C_2	C_2	C_2
Modul 3		C_1	C_1	B_1	B_1	B_1
Modul 4		D	D	C_1	C_1	B_2
Modul 5				B_3	B_3	B_2
Modul 6				D	D	C_1
Modul 7						D

In den folgenden Tabellen sind diejenigen Konfigurationen für den jeweils rechten Finger aufgelistet, die sich für die genannte Handhabungsobjektreihenfolge unter der Berücksichtigung verschiedener Gewichtungen von Fingerqualität (Gewichtungsfaktor x_F) und Rekonfigurationsaufwand (Gewichtungsfaktor x_R) sowie der Verwendung der beiden Algorithmen Dijkstra und Belman-Ford ergeben.

Tabelle 8-27: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge bei ausgeglichener Gewichtung und unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus

	Kugel 1	Zylinderteil 2	Hohlteil 3	Schmalz 4	Pilzteil 5	Flachteil 6
Bewertung	3,70	3,60	3,35	3,6	3,30	3,35
Modul 1	A	A	A	A	A	A
Modul 2	D	C_2	C_2	C_2	C_2	C_2
Modul 3		C_1	C_1	B_2	B_2	B_2
Modul 4		D	B_3	C_1	C_1	B_3
Modul 5			D	B_3	B_2	C_1
Modul 6				D	D	B_2
Modul 7						D

$x_F = 0,5$, $x_R = 0,5$, Dijkstra-Algorithmus, Durchlaufzeit: 16,69 s

Tabelle 8-28: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge mit dem Fokus auf einer hohen Fingerqualität und unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus

	Kugel 1	Zylinderteil 2	Hohlteil 3	Schmalz 4	Pilzteil 5	Flachteil 6
Bewertung	3,70	3,60	3,65	3,65	3,70	3,40
Modul 1	A	A	A	A	A	A
Modul 2	D	C_2	C_2	C_2	C_2	C_2
Modul 3		C_1	C_1	B_1	B_1	B_1
Modul 4		D	D	C_1	C_1	B_2
Modul 5				B_3	B_3	B_2
Modul 6				D	D	C_1
Modul 7						D

$x_F = 0,99$, $x_R = 0,01$, Dijkstra-Algorithmus, Durchlaufzeit: 16,75 s

Tabelle 8-29: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge mit dem Fokus auf einen geringeren Rekonfigurationsaufwand und unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus

	Kugel_1	Zylinderteil_2	Hohlteil_3	Schmalz_4	Pilzteil_5	Flachteil_6
Bewertung	3,35	3,25	3,30	3,60	3,55	3,00
Modul 1	A	A	A	A	A	A
Modul 2	B_1	C_2	C_2	C_2	C_2	C_2
Modul 3	B_1	C_1	C_1	B_2	B_2	B_2
Modul 4	D	B_1	B_1	C_1	C_1	B_3
Modul 5		B_1	B_1	B_1	C_4	C_1
Modul 6		D	D	B_1	B_1	B_1
Modul 7				D	C_3	B_1
Modul 8					D	D

$x_F = 0,01, x_R = 0,99$, Dijkstra-Algorithmus, Durchlaufzeit: 16,53 s

Tabelle 8-30: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge bei ausgeglichener Gewichtung und unter Verwendung des Bellman-Ford-Algorithmus

	Kugel_1	Zylinderteil_2	Hohlteil_3	Schmalz_4	Pilzteil_5	Flachteil_6
Bewertung	3,35	3,25	3,30	3,60	3,60	3,00
Modul 1	A	A	A	A	A	A
Modul 2	B_1	C_2	C_2	C_2	C_2	C_2
Modul 3	B_1	C_1	C_1	B_2	B_2	B_2
Modul 4	D	B_1	B_1	C_1	C_1	B_3
Modul 5		B_1	B_1	B_1	B_1	C_1
Modul 6		D	D	B_1	B_1	B_1
Modul 7				D	D	B_1
Modul 8						D

$x_F = 0,5, x_R = 0,5$, Bellman-Ford-Algorithmus, Durchlaufzeit: 16,40 s

Tabelle 8-31: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge mit dem Fokus auf einer hohen Fingerqualität und unter Verwendung des Bellman-Ford-Algorithmus

	Kugel_1	Zylinderteil_2	Hohlteil_3	Schmalz_4	Pilzteil_5	Flachteil_6
Bewertung	3,70	3,60	3,35	3,60	3,70	3,35
Modul 1	A	A	A	A	A	A
Modul 2	D	C_2	C_2	C_2	C_2	C_2
Modul 3		C_1	C_1	B_2	B_#1	B_2
Modul 4		D	B_3	C_1	C_1	B_3
Modul 5			D	B_3	B_3	C_1
Modul 6				D	D	B_2
Modul 7						D

$x_F = 0,99, x_R = 0,01$, Bellman-Ford-Algorithmus, Durchlaufzeit: 16,87 s

Tabelle 8-32: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge mit dem Fokus auf einen geringeren Rekonfigurationsaufwand und unter Verwendung des Bellman-Ford-Algorithmus

	Kugel_1	Zylinderteil_2	Hohlteil_3	Schmalz_4	Pilzteil_5	Flachteil_6
Bewertung	3,35	3,25	3,30	3,60	3,60	3,00
Modul 1	A	A	A	A	A	A
Modul 2	B_1	C_2	C_2	C_2	C_2	C_2
Modul 3	B_1	C_1	C_1	B_2	B_2	B_2
Modul 4	D	B_1	B_1	C_1	C_1	B_3
Modul 5		B_1	B_1	B_1	B_1	C_1
Modul 6		D	D	B_1	B_1	B_1
Modul 7				D	D	B_1
Modul 8						D

$x_F = 0,01, x_R = 0,99$, Bellman-Ford-Algorithmus, Durchlaufzeit: 16,19 s

Je nach Wahl der Gewichtungsfaktoren werden verschiedene Konfigurationen für die einzelnen Handhabungsobjekte am besten bewertet. Bei einer starken Gewichtung des Rekonfigurationsaufwandes werden Konfigurationen gewählt, deren Fingerqualität teilweise deutlich niedriger ist als bei der unabhängigen Betrachtung der Handhabungsobjekte. Jedoch gibt es in diesem Fall mehrere Modulsequenzen, die für mehrere Handhabungsobjekte verwendet werden können und so den Rekonfigurationsaufwand reduzieren.

9 Ergebnisse und Bewertung

9.1 Ergebnisse der Baukastenentwicklung

Im ersten Teil der Methode wird das Vorgehen zur Entwicklung eines modularen Greiferfingerbaukastens beschrieben. Das Vorgehen orientiert sich dabei an gängigen Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien. Die Modularisierung erfolgt auf Basis der Beziehungen zwischen den Anforderungen bzw. technischen Merkmalen des Gesamtbaukastens. Bedingt durch die zufällige Auswahl der DSM-Elemente in der Anwendung des IGTA-Algorithmus zur Zuordnung der DSM-Elemente zu Clustern, ergeben sich nur bedingt wiederholbare Ergebnisse. Die Anwendung des Algorithmus liefert dafür eine erste Unterteilung in Module, basierend auf den Abhängigkeiten zwischen den DSM-Elementen. Dies unterstützt den Anwender und bietet ein Gegengewicht zu dem oft angewendeten „Bauchgefühl“. Das Ergebnis des IGTA-Algorithmus sollte allerdings nicht als eindeutig aufgefasst werden, sondern im Detail geprüft und die Zuordnung angepasst werden.

Aufbauend auf Anforderungen aus der Literatur konnte in der Erprobung systematisch ein modularer Greiferfingerbaukasten für die zwei betrachteten Greifermodelle entwickelt werden. Dieser umfasst die folgenden Module in der genannten Anzahl:

Tabelle 9-1: Umfang des modularen Greiferfingerbaukastens (A_Klüpfel, 2021, S. 25)

Bezeichnung	Typ	Dimensionen			Anzahl
		Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	
A_1	Basis EGL 90	59,70	24,50	15,00	2
A_2	Basis EGI 80	45,50	30,00	15,00	2
B_1	gerade	24,50	24,50	22,00	4
B_2	gerade	24,50	24,50	36,00	4
B_3	gerade	24,50	24,50	59,00	2
C_1	abgewinkelt	24,50	24,50	36,00	2
C_2	abgewinkelt	24,50	24,50	36,00	2
C_3	abgewinkelt	24,50	24,50	27,55	2
C_4	abgewinkelt	24,50	24,50	27,55	2
D_K	Fingerspitze (Kraft)	47,94	24,50	48,00	2
D_A	Fingerspitze (Abstand)	36,00	24,50	48,00	2
					$\Sigma = 26$

9.1.1 Baukastenanalyse

Die Festlegung der Längenausprägungen der geraden Module (B_1, B_2 und B_3) erfolgte durch die geometrische Entwicklung mittels Normzahlreihe. Um das Ziel einer möglichst großen Variantenvielfalt mit möglichst geringer Anzahl an Modulen zu erreichen, kann mit der automatisierten Erzeugung und Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen eine numerische und statistische Auswertung des gesamten Greiferfingerbaukastens erfolgen. Entsprechend Kapitel 8.3.4 ergeben sich 253.534 Kombinationsmöglichkeiten aus dem Baukasten. Die folgenden Tabellen zeigen, wie sich diese Anzahl durch Anwendung der objektunabhängigen Kriterien reduziert: Für den Greifer EGI 80 können 96,33 % der Kombinationsmöglichkeiten ausgeschlossen werden und es verbleiben 9.316 gültige Kombinationen. Für den EGL 90 können sogar 99,99 % der Kombinationsmöglichkeiten ausgeschlossen werden. Hauptgrund hierfür ist der Achsversatz der Grundbacken des Greifers (A_Klüpfel, 2021, S. 65–66).

Tabelle 9-2: Einschränkungen der Konfigurationsmöglichkeiten durch objektunabhängige Kriterien für den Greifer EGI 80 (A_Klüpfel, 2021, S. 66)

k	gültig	ungültig			Σ	objektunabhängig ungültig
		Falsche Orientierung / Position der Fingerspitze	Kollision der Finger	Zu lange Finger		
2	1	0	0	0	1	0,00 %
3	5	1	1	0	7	28,57 %
4	23	12	9	0	44	47,73 %
5	97	84	65	0	246	60,57 %
6	344	450	382	30	1.206	71,48 %
7	950	1.930	1.830	360	5.070	81,26 %
8	2.098	6.520	7.010	2.012	17.640	88,11 %
9	3.918	16.320	20.430	7.212	47.880	91,82 %
10	1.880	26.460	40.740	21.640	90.720	97,93 %
11	0	18.480	42.000	30.240	90.720	100,00 %
Σ	9.316	70.257	112.467	9.946	253.534	

Der Lösungsraum, in dem die gültigen Greiferfingerkombinationen für einen Greifer gefunden werden können, wird von der Grenzlinie (s. Abbildung 8-10) aufgespannt. Der Ausnutzungsgrad des Lösungsraums wird aus der konvexen Hülle der einzelnen Konfigurationslösungen bestimmt und kann als Flächenverhältnis der konvexen Hülle im Vergleich zum gesamten Lösungsraum ermittelt werden. Abbildung 9-1 zeigt den

Ausnutzungsgrad für den EGI 80. Die maximale Fingerlänge, die mit dem Baukasten erreicht werden kann, beträgt 197,2 mm.

Tabelle 9-3: Einschränkungen der Konfigurationsmöglichkeiten durch objektunabhängige Kriterien für den Greifer EGL 90 (A_Klüpfel, 2021, S. 66)

k	ungültig				Σ	objektunabhängig ungültig
	gültig	Falsche Orientierung / Position der Fingerspitze	Kollision der Finger	Zu lange Finger		
2	0	1	0	0	1	100,00 %
3	0	6	1	0	7	100,00 %
4	1	34	9	0	44	97,73 %
5	6	175	65	0	246	97,56 %
6	15	797	382	12	1.206	98,76 %
7	14	3.132	1.830	94	5.070	99,72 %
8	0	10.240	7.010	390	17.640	100,00 %
9	0	26.190	20.430	1.260	47.880	100,00 %
10	0	46.830	40.740	3.150	90.720	100,00 %
11	0	43.680	42.000	5.040	90.720	100,00 %
Σ	36	131.085	112.467	9.946	253.534	

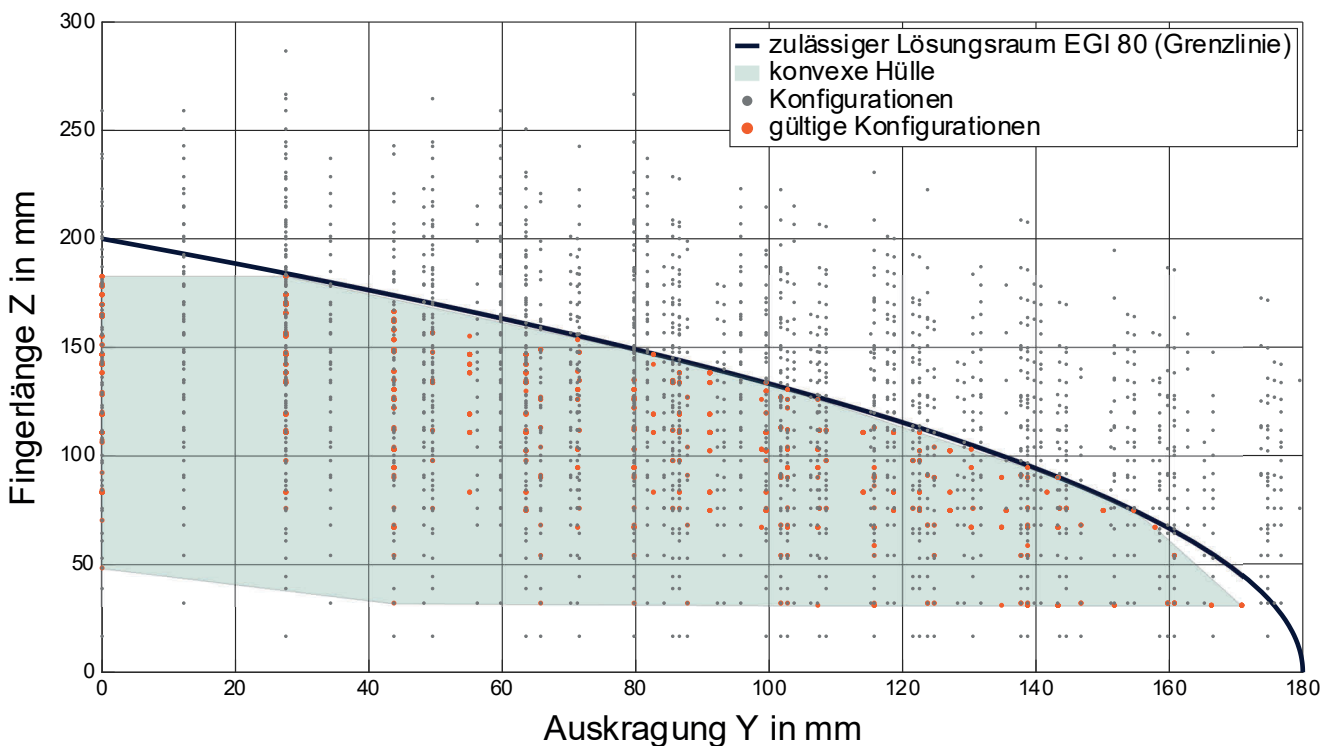


Abbildung 9-1: Ausnutzungsgrad des Lösungsraumes für den EGI 80 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 67))

Die Fingerlängen, die mit dem Baukasten erreicht werden können, liegen zwischen 30,90 mm und 187,10 mm. Die minimale Fingerlänge kann bei seitlicher Orientierung der Fingerspitze in Kombination mit einer Auskrugung erreicht werden. Die geringste Fingerlänge bei geraden Fingern beträgt 48,10 mm, und die maximal erreichbare Auskrugung liegt bei 174,75 mm. Zusammengefasst deckt der Baukasten beim EGL 80 72,71 % des möglichen Lösungsraumes ab. Zwischen zwei Größenstufen in der Auskrugung als auch in der Fingerlänge beträgt der geometrische Abstand maximal 22,00 mm. Aufgrund fehlender Module im Baukasten, um den Achsversatz der Grundbacken beim EGL 90 auszugleichen, liegen die gültigen Konfigurationen auf einer Linie. Für gerade Finger muss der Achsversatz zunächst ausgeglichen werden und resultiert in einer minimalen Fingerlänge von 75,65 mm.

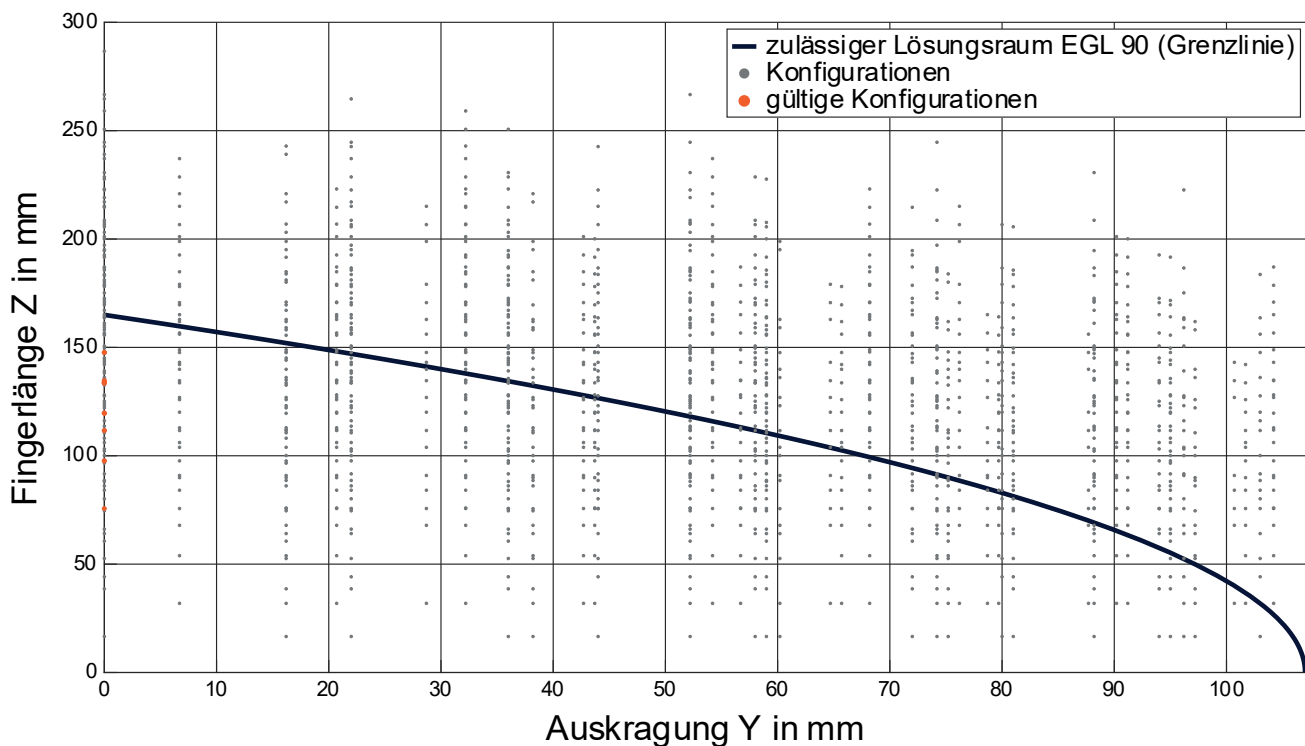


Abbildung 9-2: Ausnutzungsgrad des Lösungsraumes für den EGL 90 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 67))

9.1.2 Baukastenoptimierung

Der existierende Baukasten deckt den Lösungsraum gerade für den EGL 80 bereits sehr gut ab. Es soll an dieser Stelle geprüft werden, ob der Baukastenumfang sowie die Ausprägungen der Module optimiert werden können, um einen besseren Ausnutzungsgrad für beide Greifer zu erreichen.

Um dies zu erreichen, werden verschiedene Baukästen untersucht. Die Basismodule vom Typ A, die abgewinkelten Module vom Typ C und die Fingerspitzen vom Typ D werden nicht variiert, da sie gemäß der variantengerechten Produktgestaltung durch eine Eins-zu-Eins-Zuordnung feste Funktionen erfüllen. Das Modul B_3 kommt lediglich bei 46,99 % aller gültigen Konfigurationen zum Einsatz, weshalb untersucht wird, ob auf diese Längenabstufung verzichtet werden kann. Um trotzdem die maximale Fingerlänge beim EGI 80 zu erreichen, werden die Mengen von B_1 und B_2 Modulen verändert (Baukasten 2). Um den Achsversatz des EGL 90 auszugleichen, wird in Baukasten 3 die minimale Modullänge von 22 mm auf 27,55 mm geändert (A_Klüpfel, 2021, S. 71).

Die folgende Tabelle zeigt die Ausnutzungsgrade der verschiedenen Baukästen für die beiden Greifer.

Tabelle 9-4: Ausnutzungsgrade der verschiedenen Baukästen

	EGI 80	EGL 90
Baukasten 1 (original)	72,91 %	0,00 %
Baukasten 2	72,12 %	0,00 %
Baukasten 3	66,56 %	32,71 %

Anhand der Untersuchungen wird deutlich, dass auf das Modul B_3 verzichtet werden kann. Die mit dem Modul B_3 erreichbaren Fingerlängen und Auskragungen werden durch zusätzliche Module vom Typ B_2 kompensiert.

Tabelle 9-5: Übersicht zu Modulen und Modulanzahl des optimierten Baukastens (A_Klüpfel, 2021, S. 71)

Bezeichnung	Typ	Dimensionen			Anzahl
		Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	
A_1	Basis EGL 90	59,70	24,50	15,00	2
A_2	Basis EGI 80	45,50	30,00	15,00	2
B_1	gerade	24,50	24,50	27,55	2
B_2	gerade	24,50	24,50	36,00	6
C_1	abgewinkelt	24,50	24,50	36,00	2
C_2	abgewinkelt	24,50	24,50	36,00	2
C_3	abgewinkelt	24,50	24,50	27,55	2
C_4	abgewinkelt	24,50	24,50	27,55	2
D_K	Fingerspitze (Kraft)	47,94	24,50	48,00	2
D_A	Fingerspitze (Abstand)	36,00	24,50	48,00	2
					$\Sigma = 24$

Die Längenänderung des Moduls B_1 im Baukasten 3 reduziert zwar den Ausnutzungsgrad für den EGL 80, jedoch ermöglicht sie auch zusätzliche gültige Konfigurationen für den EGL 90. Damit haben drei Module des Baukastens die gleiche Länge, was sich wiederum positiv auf die Herstellung auswirkt. Mit den beschriebenen Änderungen reduziert sich zudem die interne Vielfalt des Baukastens. Tabelle 9-5 zeigt den optimierten Baukasten 3.

9.1.3 Funktionsintegration

Im Rahmen der Baukastengestaltung wurden auch zwei Sensoren in die Fingerspitze integriert. Die Sensorsysteme sind dabei so gestaltet, dass der Sensor in der Fingerspitze ausgetauscht werden kann. Im Vergleich zum Stand der Technik bedeutet das, dass sich der Finger nicht an den Sensor, sondern der Sensor an den Finger anpasst.

9.2 Greiferfingerkonfiguration

Die Funktion der Greiferfingerkonfiguration konnte im Rahmen der Erprobung bereits gezeigt werden. Im Folgenden wird auf die Greifpositionsbestimmung sowie die Konfigurationsergebnisse für das im Rahmen dieser Arbeit definierte Handhabungsobjektspektrum näher eingegangen.

9.2.1 Ergebnisse der Greifpositionsbestimmung

Es können für alle Objekte des Handhabungsobjektspektrums gültige Greifpositionen bestimmt werden. Die Zeit zur Ermittlung der Positionen ist abhängig von der Komplexität und Auflösung der STL-Datei des Objekts. Die folgende Abbildung 9-3 zeigt die Zeiten, die der Algorithmus benötigt, um die Greifpositionen für die jeweils 36 Handhabungsobjekte zu ermitteln.

Darüber hinaus wird deutlich, dass mit zunehmender Anzahl der Dreiecke zur Tessellierung und Approximierung der Objektoberflächen auch die Zeit zur Ermittlung der Greifpositionen steigt. Die runde Oberfläche der Kugelobjekte wird im Vergleich z.B. zum Flachteil durch deutlich mehr und kleinere Dreiecke approximiert. Dadurch steigt der Rechenaufwand zur Untersuchung dieser Flächen.

Darüber hinaus können für beliebige Objekte Greifpositionen bestimmt werden. In der folgenden Abbildung 9-4 ist das Modell eines Flaschendeckels und die zugehörigen Greifpositionen abgebildet. Aufgrund von Details, wie der geriffelten Oberfläche und den Gewindegängen liegt die Durchlaufzeit für den Flaschendeckel bei 123,08 s.

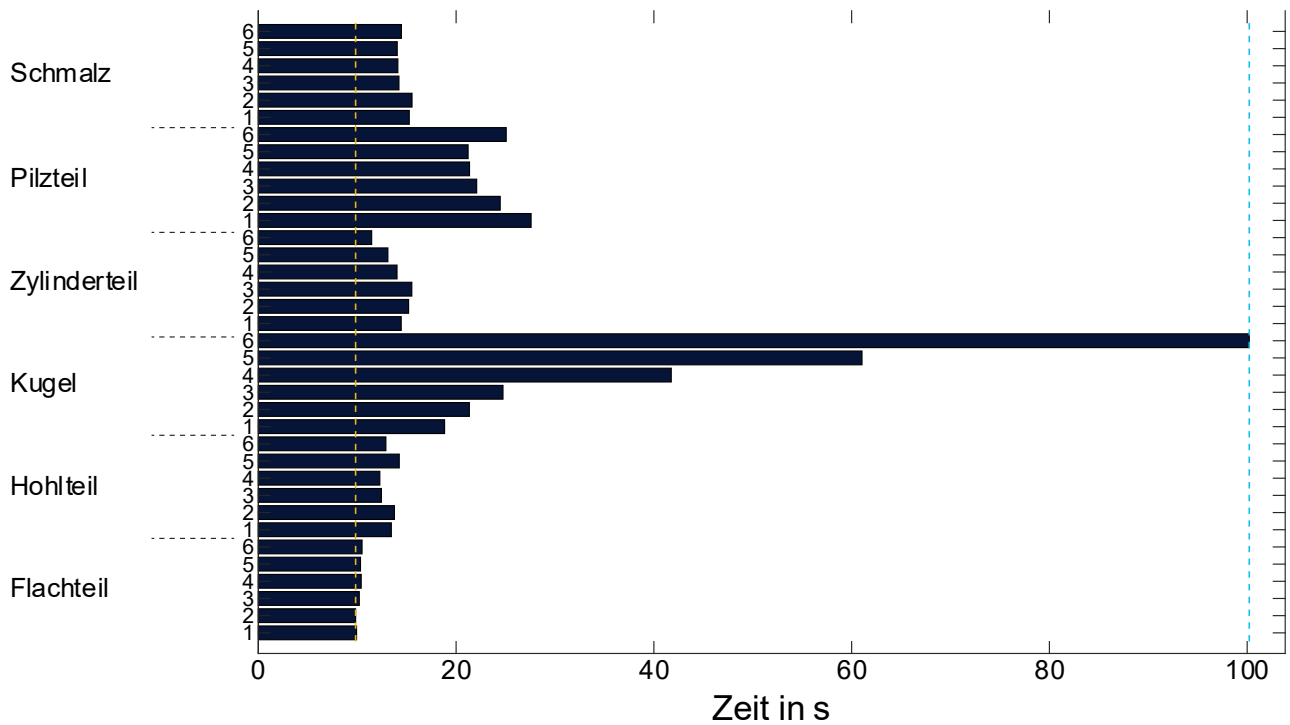


Abbildung 9-3: Rechenzeiten zur Ermittlung und Bewertung von jeweils fünf Greifpositionen pro Handhabungsobjekt

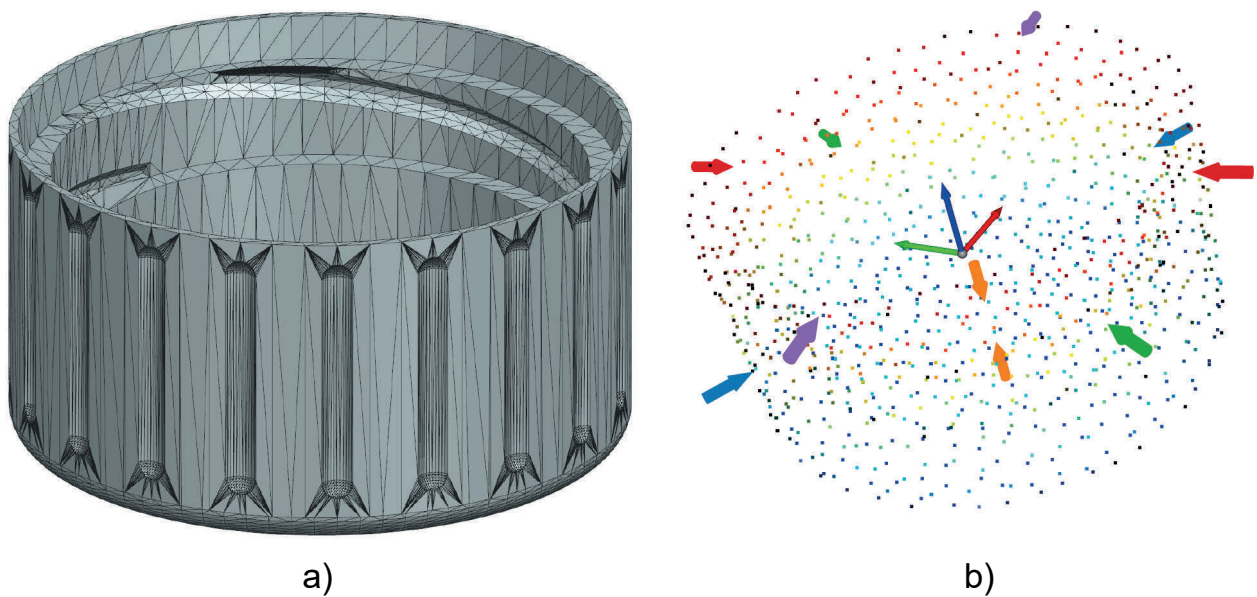


Abbildung 9-4: CAD-Modell eines Flaschendeckels (a) und zugehörige ermittelte Greifpositionen (b)

9.2.2 Ergebnisse der Greiferfingerkonfiguration

Beim **EGI 80** können für 35 der 36 Testobjekte gültige Konfigurationen gefunden werden, mit Ausnahme des Handhabungsobjekts Schmalz_6. Diese Konfigurationen enthalten sowohl gerade Finger als auch Finger mit seitlicher Auskrugung und Auskrugung

in Greifrichtung. Die Anzahl verwendeter Module steigt mit zunehmender Störkontur der Handhabungsobjekte. Für 41,37 % der Objekte wird die kleinste Konfiguration, bestehend aus Basismodul und Fingerspitze, als beste Konfiguration ermittelt (s. Abbildung 9-5 a). Mit zunehmender Objektgröße enthalten die Fingerkonfigurationen Auskragungen in x-Richtung. Während die Hohlteile in den Größenstufen Eins bis Fünf an den Außenflächen der kurzen Seiten gegriffen werden, wird für Hohlteil_6 nur der Rand gegriffen (Abbildung 9-5 b).

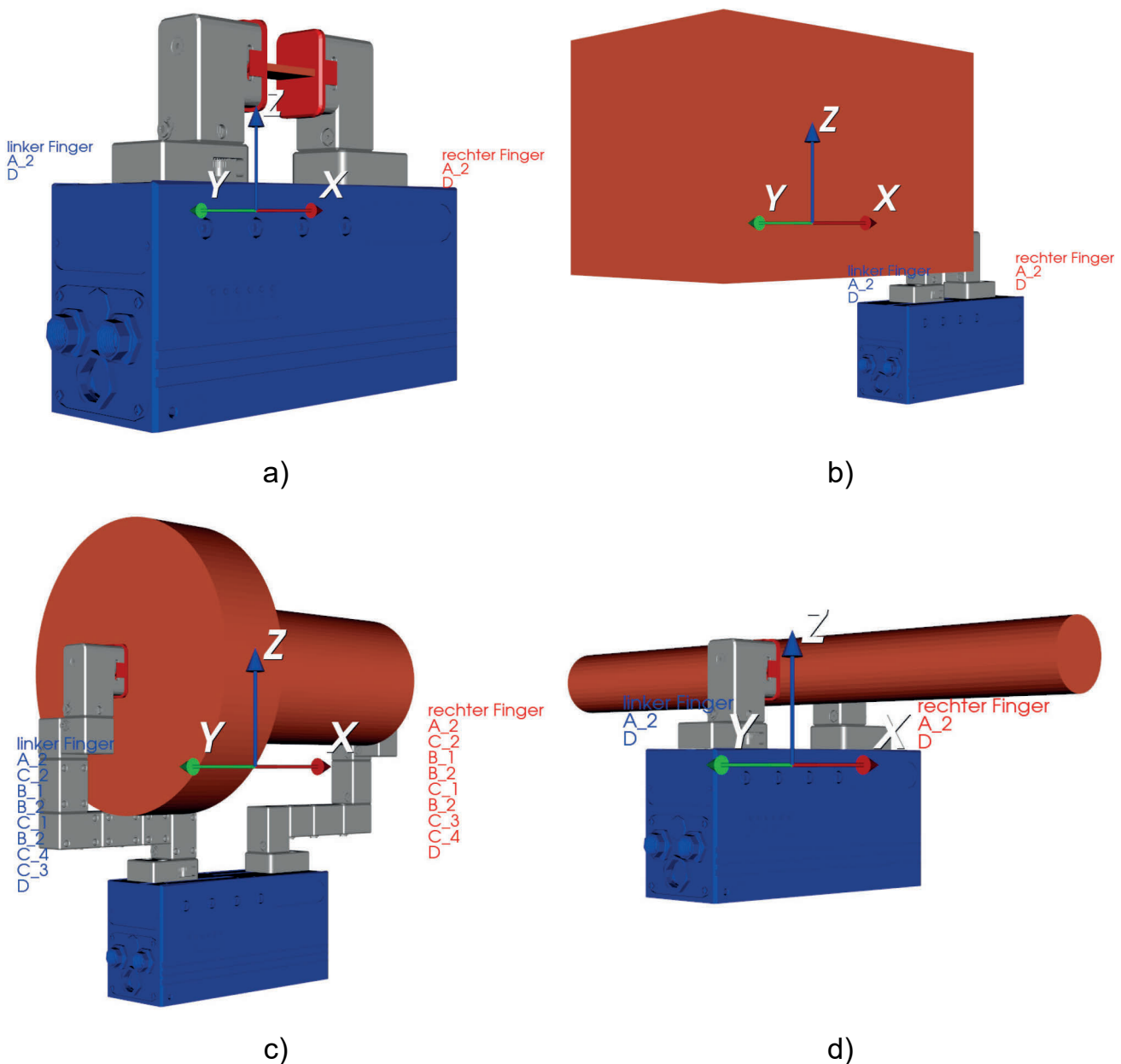


Abbildung 9-5: Exemplarische Konfigurationen, die für den EGI 80 für ausgewählte Objekte des Handhabungsobjektspektrums ermittelt wurden

Um eine Kollision des Objekts mit den Greiferfingern zu verhindern, erhält die Konfiguration für Pilzteil_6 eine seitliche Auskragung in y-Richtung und erreicht mit neun

Modulen pro Finger fast die maximale Anzahl an Modulen (Abbildung 9-5 c). Zwischen den Größenstufen 5 und 6 des Zylinderteils wechselt die Lage der Greifpositionen, so dass Zylinderteil_6 nicht mehr an den Stirnseiten, sondern am Schaft gegriffen wird (Abbildung 9-5 d).

Für den **EGL 90** können für 17 der 36 Testobjekte gültige Konfigurationen gefunden werden.

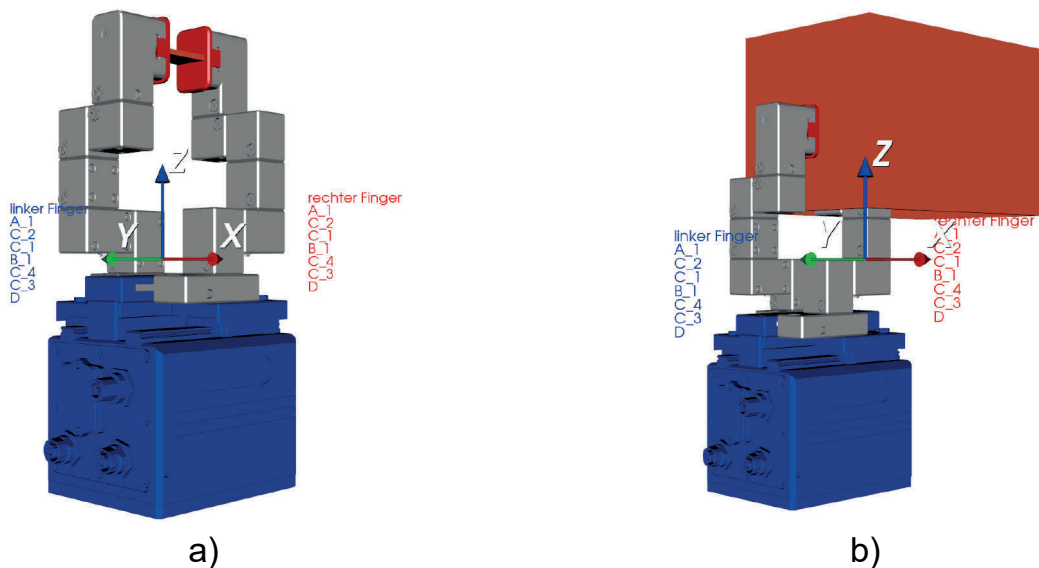


Abbildung 9-6: Exemplarische Konfigurationen, die für den EGL 90 für ausgewählte Objekte des Handhabungsobjektspektrums ermittelt wurden

Keine Konfigurationen können für die Handhabungsobjekte Flachteil_6, Hohlteil_6, Kugel_5, Kugel_6, Zylinderteil_6, Pilzteil_3, Pilzteil_4, Pilzteil_5, Pilzteil_6, Schmalz_2, Schmalz_3, Schmalz_4, Schmalz_5 und Schmalz_6 ermittelt werden. Obwohl der Ausnutzungsgrad für den EGL 90 deutlich geringer ist als der des EGI 80, können mit nur drei unterschiedlichen Konfigurationen alle 17 Objekte gegriffen werden.

9.2.3 Bewertung von Handhabungsobjektfolgen

Um die minimale Anzahl an Konfigurationen zur Handhabung eines festgelegten Sets an Handhabungsobjekten zu bestimmen, wird ein Netzwerk aus Knoten (Nutzwerte der Konfigurationen) und Pfaden (Rekonfigurationsaufwände) aufgebaut und dann nach dem Weg mit den geringsten Rekonfigurationsaufwänden durchsucht. Die Wahl des Weges ist abhängig von den gewählten Gewichtungsfaktoren für den Rekonfigurationsaufwand und die Fingerqualität. In der Erprobung konnte gezeigt werden, dass die Wahl der Gewichtungsfaktoren die Wahl des Weges beeinflusst, und dass abhängig vom Objekt unterschiedliche Knoten im Netzwerk ausgewählt werden.

Im Folgenden soll das Verhalten der durchschnittlichen Nutzwerte bei einer Variation der Gewichtungsfaktoren betrachtet werden. Bei der Verwendung von drei unterschiedlichen Objektreihenfolgen, die in Tabelle 9-6 dargestellt sind, werden die ermittelten Nutzwerte der Konfigurationen bei sich ändernden Gewichtungsfaktoren erfasst.

Tabelle 9-6: Exemplarische Handhabungsobjektreihenfolgen für die Untersuchung des Nutzwertverlauf bei sich ändernden Gewichtungsfaktoren

	Set 1	Set 2	Set 3
Handhabungsobjekt 1	Kugel_1	Zylinderteil_1	Pilzteil_1
Handhabungsobjekt 2	Zylinderteil_2	Schmalz_2	Schmalz_2
Handhabungsobjekt 3	Hohlteil_3	Flachteil_3	Kugel_3
Handhabungsobjekt 4	Schmalz_4	Pilzteil_4	Hohlteil_4
Handhabungsobjekt 5	Pilzteil_5	Hohlteil_5	Flachteil_5
Handhabungsobjekt 6	Flachteil_6	Kugel_6	Zylinderteil_6

Die folgenden Abbildungen 9-8 und 9-7 zeigen das Ergebnis. Es zeigt sich, dass beide Algorithmen ähnliche oder sogar identische (siehe Set 2 in Abbildung 9-7 a) Ergebnisse liefern. Es kann für beide Algorithmen festgestellt werden, dass die durchschnittlichen Nutzwerte der ermittelten Konfigurationen bei zunehmender Gewichtung der Fingerqualität durch den Anwender steigen.

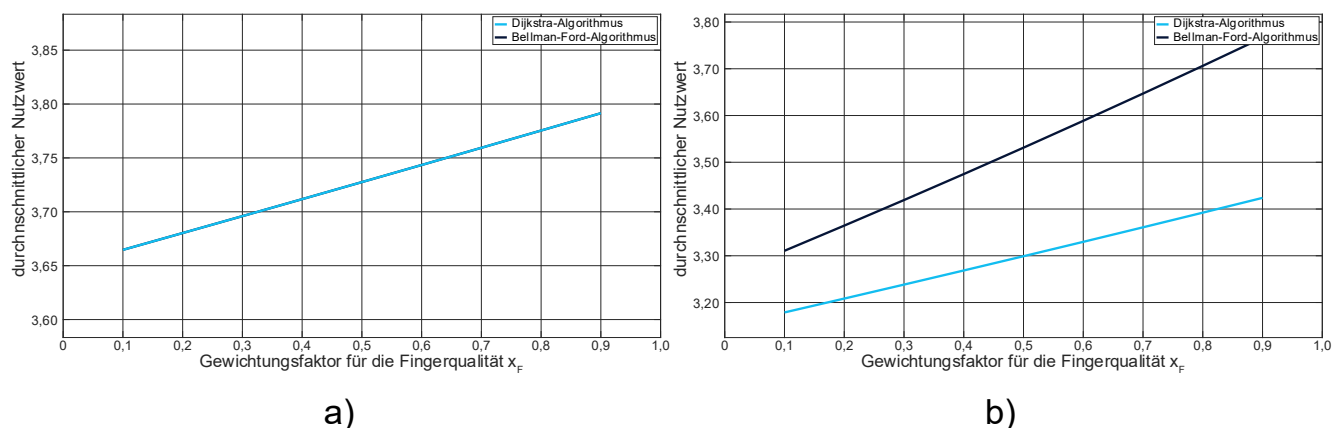


Abbildung 9-7: Gesamtnutzwerte des Baukastens mit dem Greifer EGI 80 zwei Variationen der Gewichtungsfaktoren (Datenpunkte durch interpolierende Linie angenähert)

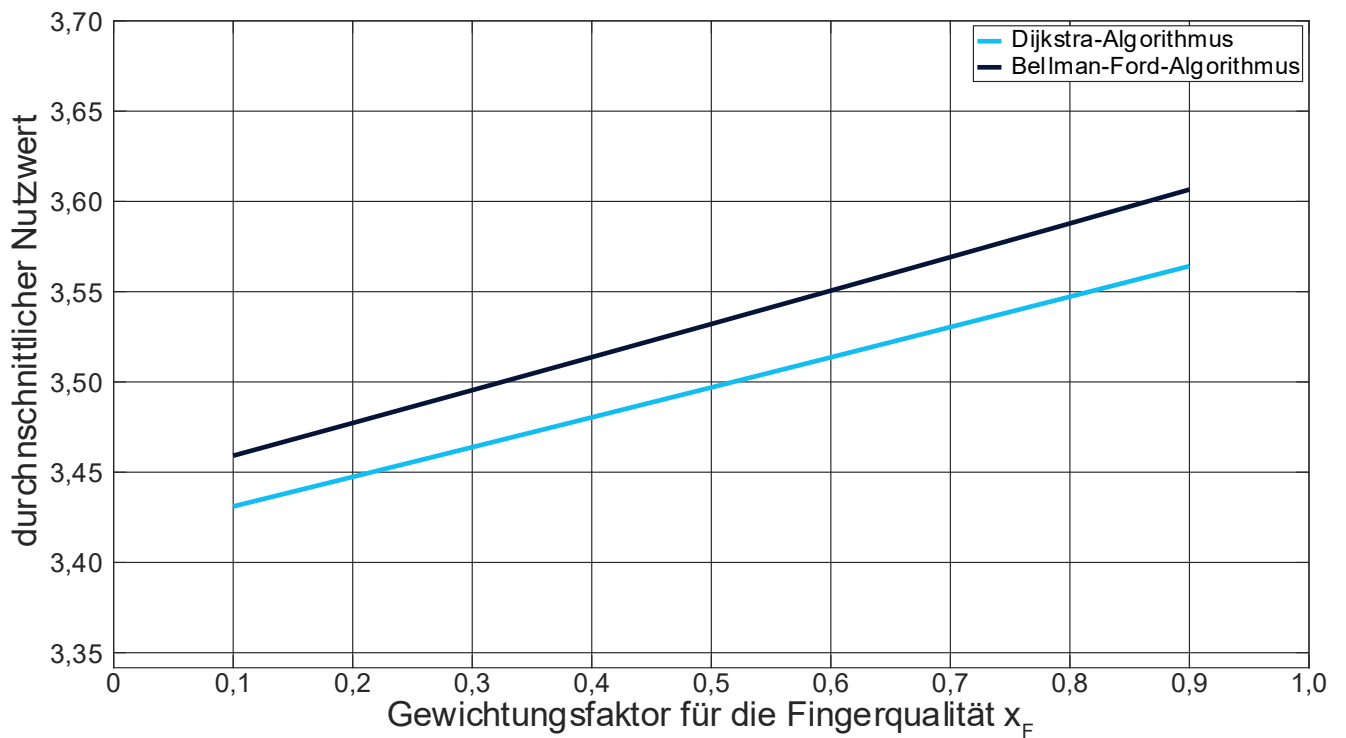


Abbildung 9-8: Gesamtnutzwerte des Baukastens mit dem Greifer EGI 80 und einer weiteren Variation der Gewichtungsfaktoren (Datenpunkte durch interpolierende Linie angenähert)

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Im Kontext des Wandels der industriellen Produktion hin zu einer stärkeren Vernetzung, Automatisierung und höheren Flexibilität der Produktionsprozesse sind Handhabungssysteme von besonderer Bedeutung. Um kleine Losgrößen flexibel und schnell produzieren zu können, müssen Anpassungsprozesse von Produktionslinien an sich ändernde Randbedingungen beschleunigt werden. Die meist langsame, manuelle und damit kostenintensive Anpassung der Wirkelemente von Handhabungssystemen rückt dabei in den Fokus der Betrachtung.

Basierend auf dieser Ausgangssituation wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine durchgängige Methode zur automatisierten Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten entwickelt. Ausgehend von dem durch den Anwender ausgewählten, mechatronischen Zweifingerparallelgreifer unterstützt die Methode den Anwender bei der systematischen Entwicklung eines modularen Greiferfingerbaukastens sowie der Konfiguration und Bewertung von Greiferfingern aus Elementen dieses Baukastens.

In der Phase der Baukastenentwicklung wurden aktuelle Methoden der Produktentwicklung für modulare Produktstrukturen auf Greiferfinger angewendet. In der zweiten Phase wurde ein analytisches Verfahren genutzt, um Greifpositionen an 3D-Modellen von Handhabungsobjekten zu ermitteln und zu bewerten. Baukasten und Greifpositionen bilden die Grundlage für ein Konfigurationsverfahren, das den Aufbau einer kinematischen Kette nutzt, um, basierend auf den Modulen des Baukastens und den Greifpositionen sowie unter Berücksichtigung von Randbedingungen, Greiferfinger zu ermitteln. In Anbetracht der genannten Randbedingungen ist es möglich, ungültige Konfigurationen, bei denen beispielsweise die Finger miteinander kollidieren, auszusortieren. Zur Bewertung und Auswahl der verbleibenden Greiferfingerkonfigurationen werden mehrere unabhängige Kriterien genutzt. Um eine minimale Anzahl an Greiferfingern für das sequentielle Handhaben mehrerer Handhabungsobjekte zu ermitteln, wurde ein Verfahren—ergänzend zur Bewertung—beschrieben, das die Greiferfingerkonfigurationen mit dem geringsten Rekonfigurationsaufwand ermittelt.

Die Durchgängigkeit der Gesamtmethode konnte im Rahmen der Erprobung anhand von zwei mechatronischen Zweifingerparallelgreifern nachgewiesen werden. Dabei

wurde ein Baukasten entwickelt, der auf der Basis einer mechanischen und elektrischen Schnittstelle die flexible Nutzung von Sensorik in der Fingerspitze ermöglicht. Die Umsetzung der Konfigurations- und Bewertungslogik ermöglichte die Generierung, Bewertung und Visualisierung von gültigen Greiferfingerkonfigurationen. Zur Überprüfung dieser Konfigurationen wurde ein Handhabungsobjektspektrum definiert, das sich an in der Literatur genannten Objektformen orientiert und geometrisch definiert ist. Die für dieses Handhabungsobjektspektrum ermittelten Konfigurationen wurden an einem Demonstrator getestet.

Aus der abschließenden Bewertung geht hervor, dass der mit der Methode entwickelte Baukasten den möglichen Lösungsraum der betrachteten Greifer bereits sehr gut abdeckt. Die Konfigurationslogik ermittelt für einen Großteil des Handhabungsobjektspektrums gültige Greiferfingerkonfigurationen, ermöglicht die Ermittlung der minimal notwendigen Konfigurationen für eine Handhabungsobjektfolge und unterstützt die Optimierung des Baukastens.

10.2 Ausblick

Im Hinblick auf die Überführung der Methode hin zu einer industriellen Anwendung ergibt sich Potenzial für zukünftige Forschungsaktivitäten.

In erster Linie ist eine Erprobung der Vorgehensweise mit anderen Greifermodellen gleichen Typs notwendig. Hier sind Greifer anderer Hersteller und Größen zu betrachten und auch Anforderungen aus der praktischen Anwendung zu berücksichtigen. Ein Ziel bei der Gestaltung des hier entwickelten Baukastens ist es, eine möglichst gute Abdeckung des Auskragungskennfeldes zu erreichen. Es bleibt zu untersuchen, ob am Markt tatsächlich das vollständige Auskragungskennfeld nachgefragt wird. Auf Basis von Nutzerpräferenzen, die beispielsweise durch den Einsatz des Konfigurators ermittelt werden können, kann das Auskragungskennfeld geclustert werden. Dies kann als Grundlage für eine weitere Baukastenoptimierung genutzt werden, um diesen für die marktrelevanten Cluster des Auskragungskennfeldes anzupassen.

Die entwickelte Konfigurationslogik berücksichtigt bisher die übergeordneten Merkmale Störkontur und Form des Handhabungsobjekts, und es wird eine gleichverteilte Dichte im Handhabungsobjekt angenommen. Erweiterungen dieser Funktionalität sind denkbar zur Berücksichtigung weiterer Merkmale, wie Körpereigenschaften (z.B. Masseverteilung) bestehen. Ebenfalls Teil der Konfiguration kann die Ableitung spezifischer Wirkflächen sein, die beispielsweise Merkmale an der Handhabungsobjektoberfläche

abbilden. Im Hinblick auf die Berücksichtigung von Handhabungsobjektfolgen sollten diese multifunktional sein. Grundlage hierfür kann der in (Honarpardaz, Ölvander & Tarkian, 2019) beschriebene Ansatz sein.

Für die Konfiguration der Greiferfinger wird zunächst eine stabile Pose des Handhabungsobjektes gesucht und das Objekt entsprechend orientiert. Zur Berücksichtigung von Handhabungsaufgaben kann die Konfigurationslogik auch dahingehend erweitert werden, dass die relative Position des Handhabungsobjekts zum Greifer sowie dessen Orientierung vom Anwender vorgegeben wird. Davon ausgehend müssen dann in der Konfiguration diejenigen Module ermittelt werden, mit denen die Strecke zwischen Greifer und Objekt überbrückt werden kann

Das Verfahren zur automatisierten Konfiguration von Greiferfingern verfügt bereits über einen hohen Automatisierungsgrad, jedoch müssen die einzelnen Anwendungsteile einzeln manuell gestartet werden. Das ist in dieser Phase der Entwicklung von Vorteil, um schnell Änderungen vornehmen zu können, jedoch bedarf es einer ganzheitlichen Systemintegration, zu der eine anwenderfreundliche Bedienoberfläche zählt.

Neben der inhaltlichen Weiterentwicklung der Methode können auf dieser Basis unterschiedliche Geschäftsmodelle entstehen: Einerseits besteht die Möglichkeit eines Direktverkaufs von konfigurierten Greiferfingern, z.B. in Kombination mit einem Greifermodell. Dies macht bei wechselnden Handhabungsaufgaben nur bedingt Sinn. Eine andere Möglichkeit ist der Verkauf des Baukastens und eine damit verbundene Nutzung des Konfigurators durch den Kunden. Auch Abonnement-Modelle sind denkbar, bei denen Kunden beispielsweise pro Konfiguration oder für eine Nutzungsdauer bezahlen. Die Möglichkeiten zur Ausgestaltung geeigneter Geschäftsmodelle sind vielfältig und abhängig von verschiedenen Umständen, die z.B. mit Business Analytics, Data Science Methoden oder einer Marktforschung untersucht werden können.

11 Publikationsliste

Die im Folgenden chronologisch aufgelisteten Nachweise umfassen alle im Rahmen der Tätigkeit des Autors am wbk Institut für Produktionstechnik (mit-)verfassten Publikationen:

Erstautorenschaft

Friedmann, M., Nguyen Duc, H., Coutandin, S., Fleischer, J. & May, M. (2019), „Intelligent, konnektiv, sensitiv“, *handling*, 2019(6), S. 14–15.

Friedmann, M. & Fleischer, J. (2022), „Automated Configuration of Modular Gripper Fingers“, *Proceedings of the 9th Conference on Assembly Technology and Systems (CATS)*, Elsevir, S. 70–75, DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.157.

Friedmann, M., Schabel, S., Gerber, J., Döhring, A., Meschter, L., Fleischer, J. & May, M. (2022), „Greiferfinger für eine schnelle Rekonfiguration/Gripper fingers for fast reconfiguration - Modular construction kit for creating application-specific gripper fingers“, *wt Werkstattstechnik online*, 112(09), S. 629–634, DOI: 10.37544/1436-4980-2022-09-101.

Friedmann, M., Klüpfel, D., Frech, C., Liu, M., Hauf, J., Li, G., Friedrich, C. & Fleischer, J. (2023), „Automated Configuration of Gripper Fingers from a Construction Kit for Robotic Applications“, *Machines*, 11(8), DOI: 10.3390/machines11080804.

Mitautorenschaft

Fleischer, J., Baranowski, M., Matkovic, N. & **Friedmann, M.** (2021), „3D-Druck für die Mobilität von morgen/Additive-subtractive process with inline process control for highly functional plastic components – 3D printing for the mobility of the future“, *wt Werkstattstechnik online*, 111(11-12), S. 807–811, DOI: 10.37544/1436-4980-2021-11-12-37.

Nieschlag, J., Seuffert, J., Strack, D., **Friedmann, M.**, Kärger, L., Henning, F. & Fleischer, J. (2021), „Experimental and Numerical Analysis of Mold Filling in Rotational Molding“, *Journal of Composites Science*, 5(11), S. 1–18, DOI: 10.3390/jcs5110289.

- Scholz, J., Kaspar, J., Quirin, S., Kneidl, B., Kleiner, S., **Friedmann, M.**, Fleischer, J., Herrmann, H.-G. & Vielhaber, M. (2021), „Konzept eines systemischen Entwicklungsprozesses zur Hebung von Leichtbaupotenzialen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(11), S. 797–800, DOI: 10.1515/zwf-2021-0182.
- Andreu, A., Kim, S., Dittus, J., **Friedmann, M.**, Fleischer, J. & Yoon, Y.-J. (2022), „Hybrid material extrusion 3D printing to strengthen interlayer adhesion through hot rolling“, *Additive Manufacturing*, 55, S. 102773, DOI: 10.1016/j.addma.2022.102773.
- Baranowski, M., Scholz, J. & **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2022), „Flexible Anbindung von Maschinen in der Produktion. Erfolgreiche Verknüpfung einer SLS-Anlage mittels der Cybus Connectware“, *VDI-Z integrierte Produktion*, 164(07-08), S. 76–78, DOI: 10.37544/0042-1766-2022-07-08.
- Brand, J., Heider, I., Schmid, D., **Friedmann, M.**, Gönzheimer, P. & Fleischer, J. (2022), „Effiziente Implementierung von KI-Anwendungen/Practical implementation of AI applications“, *wt Werkstattstechnik online*, 112(07-08), S. 506–510, DOI: 10.37544/1436-4980-2022-07-08-60.
- Krischke, N., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2022), „Investigations for the Optimization of Metal Freeforming using the ARBURG freeformer“, *33rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas, DOI: 10.26153/tsw/44580.
- Mangold, S., Kist, S., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2022), „Faserblasverfahren für biologische Bauteile“, *VDI-Z*, 164(11-12), S. 67–69, DOI: 10.37544/0042-1766-2022-11-12-67.
- Mangold, S., Steiner, C., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2022), „Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing“, *29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, Elsevier, S. 1–6, DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.001.
- Matkovic, N., Kupzik, D., Steidle-Sailer, C., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2022), „Novel Robot-Based Process Chain for the Flexible Production of Thermoplastic Components with CFRP Tape Reinforcement Structures“, *Proceedings of the 9th Conference on Assembly Technology and Systems (CATS)*, Elsevir, S. 21–26, DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.149.

- Scholz, J., Kaspar, J., König, K., **Friedmann, M.**, Vielhaber, M. & Fleischer, J. (2022), „Lightweight design of a gripping system using a holistic systematic development process - A case study“, *Proceedings of the 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME)*, Elsevier, S. 187–192, DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.033.
- Springmann, M., Matkovic, N., Schäfer, A., Waldhof, M., Schlotthauer, T., **Friedmann, M.**, Middendorf, P., Fleischer, J. & Parspour, N. (2022), „Flexible and High-Precision Integration of Inserts by Combining Subtractive and Non-Planar Additive Manufacturing of Polymers“, *Key Engineering Materials*, 926(1), S. 268–279, DOI: 10.4028/p-ed900k.
- Baranowski, M., Schubert, J., Werkle, K. T., Schoner, S., **Friedmann, M.**, Stehle, T., Fleischer, J., Schulze, V. & Mohring, H.-C. (2022 - 2022), „Additive-subtractive manufacturing of multi-material sensor-integrated electric machines using the example of the transversal flux machine“, *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, IEEE, S. 1–4, DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921711.
- Baranowski, M., Basalla, F., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2023), „Thermal Analysis of a Novel Laser Sintering Machine for Additive Manufacturing of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polymer Parts“, *SSRN Electronic Journal*, DOI: 10.2139/ssrn.4363904.
- Baranowski, M., Matkovic, N., Kleim, S., **Friedmann, M.**, Fleischer, J., Springmann, M., Middendorf, P., Schäfer, A., Waldhof, M. & Parspour, N. (2023), „Additive-Subtractive Process Chain for Highly Functional Polymer Components“, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, S. 339–346, DOI: 10.18178/ijmerr.12.6.339-346.
- Baranowski, M., Völger, L., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2023), „Experimental Analysis and Optimisation of a Novel Laser-Sintering Process for Additive Manufacturing of Continuous Carbon Fibre-Reinforced Polymer Parts“, *Applied Sciences*, 13(9), S. 5351, DOI: 10.3390/app13095351.
- Fleischer, J., **Friedmann, M.** & Wirth, F. (2023), „Transferzentren als Wegbereiter für KI in der Produktion“, *maschinenbau*, 3(3), S. 26–29, DOI: 10.1007/s44029-023-0775-y.

- König, K., Zeidler, S., Walter, R., **Friedmann, M.**, Fleischer, J. & Vielhaber, M. (2023), „Lightweight creativity methods for idea generation and evaluation in the conceptual phase of lightweight and sustainable design“, *Proceedings of the 33rd CIRP Design Conference*, Amsterdam, S. 1170–1175, DOI: 10.1016/j.procir.2023.05.008.
- Mangold, S., Gerlitz, E., Zimprich, S., **Friedmann, M.**, Matthiesen, S. & Fleischer, J. (2023), „Systematic quantitative investigation of the unscrewing process with regard to breakaway torque“, *Journal of Remanufacturing*, 13(1), S. 53–66, DOI: 10.1007/s13243-022-00120-x.
- Mangold, S., Mata, S., Barrios, A., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2023), The Control Architecture KaReSA: A Learning Disassembly System. In F. G. Galizia & M. Bortolini (Hrsg.). *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption* (Bd. 13, S. 562–569), Springer, Cham, Schweiz, DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_61.
- Matkovic, N., Höger, K., **Friedmann, M.**, Stamer, F., Fleischer, J. & Lanza, G. (2023), „Identification of hybridization strategies for combining fused filament fabrication with unidirectional tape reinforcement“, *Composites Communications*, 38(1), S. 1–10, DOI: 10.1016/j.coco.2022.101484.
- Scholz, J., Dilger, L. J., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2023), „A Methodology for Sustainability Assessment and Decision Support for Sustainable Handling Systems“, *Proceedings of the 30th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE)*, Elsevier, S. 47–52, DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.009.
- Wirth, B., Schwind, T., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2023), Automated Stack Singulation for Technical Textiles Using Sensor Supervised Low Pressure Suction Grippers. In T. Schüppstuhl, K. Tracht & J. Fleischer (Hrsg.). *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2022* (Bd. 8, S. 329–340), Springer, Cham, Schweiz, DOI: 10.1007/978-3-031-10071-0_27.
- Zeidler, S., Scholz, J., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2023), Approach to Develop a Lightweight Potential Analysis at the Interface Between Product, Production and Material. In M. Liewald, A. Verl, T. Bauernhansl & H.-C. Möhring (Hrsg.). *Production at the Leading Edge of Technology* (Bd. 116, S. 696–704), Springer, Cham, Schweiz, DOI: 10.1007/978-3-031-18318-8_69.

Baranowski, M., Krischke, N., Lorei, I., Werder, S. O. von, **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2025), Highly Modular Postprocessing by Robot Kinematics in an Additive-Subtractive Manufacturing Process for Polymer Components. In S. Ihlenfeldt, T. Schüppstuhl & K. Tracht (Hrsg.). *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2023* (Bd. 29, S. 145–158), Springer, Cham, Schweiz, DOI: 10.1007/978-3-031-74010-7_13.

Beteiligung an Erfindungsmeldungen und Patentschriften

Friedrich, C., **Friedmann, M.** & Fleischer, J. (2021), *Modular Gripping Finger, Gripping Device and Construction Kit*, Patentschrift. Vereinigte Staaten von Amerika, Patentnummer: US 12097612.

12 Literaturverzeichnis

Literaturangaben nach dem Schema **A_Name Jahr** beziehen sich auf studentische Arbeiten, die vom Verfasser im Rahmen der Tätigkeit am Karlsruher Institut für Technologie am wbk Institut für Produktionstechnik angeleitet wurden. Hier ist eine vollständige Liste in alphabetischer Reihenfolge der Arbeiten aufgeführt, die entweder im Kontext von Forschungsprojekten oder darüber hinaus im Zusammenhang mit dem Promotionsvorhaben entstanden sind. Im Anschluss folgt das alphabetisch geordnete Literaturverzeichnis aller Nachweise dieser Arbeit:

A_Bender 2018

Bender, M. (August 2018), *Implementierung einer externen Kraftsensorik in den Regelkreis eines mechatronischen Greifer*, Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Döhring 2021

Döhring, A. (Mai 2021), *Entwicklung einer universell verwendbaren Fingerspitze für den Einsatz in einem modularen Greiferfingerbaukasten*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Fan 2021

Fan, X. (Februar 2021), *Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur 3D-Szenenrekonstruktion auf Basis molekularer Kameradaten für das autonome Greifen*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Frech 2023

Frech, C. (September 2023), *Bewertung und Optimierung von Greiferfingerkonfigurationen aus einem modularen Baukasten*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Gabriel 2019

Gabriel, W. (Mai 2019), *Deep Learning für die mechanische Spannungssimulation von polygonalen 2D-Geometrien*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Gerber 2020

Gerber, J. (August 2020), *Konzeption und Entwicklung eines modularen Greiferfingerbaukastens für mechatronische Zweifinger-Parallelgreifer*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Hanke 2020

Hanke, A. (Dezember 2020), *Methoden zur Entwicklung und Gestaltung von Baukastensystemen am Beispiel des Kreiselzettwenders Volto 1100*, Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Höll 2019

Höll, P. (März 2019), *Entwicklung und Konstruktion eines modularen Fingerbaukastensystems für Greifsysteme*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Huang 2020

Huang, Y. (Juli 2020), *Development of a web front end for the configuration of gripper fingers*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Keßler 2020

Keßler, J. (Oktober 2020), *Entwicklung einer Roboteranwendung für das Handhaben von Objekten unbekannter Lage und Orientierung*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Klüpfel 2021

Klüpfel, D. (Oktober 2021), *Konzeption und Implementierung einer automatisierten Konfiguration modularer Greiferfinger aus einem Produktbaukasten*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Liu 2021

Liu, M. (September 2021), *Automated planning, selection and evaluation of grasps for 3D objects*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Meschter 2021

Meschter, L. (März 2021), *Variantengerechte Produktgestaltung für einen modularen Greiferfingerbaukasten*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Nguyen 2020

Nguyen, T. P. (Dezember 2020), *Methode zur Performancebewertung modulare Produktstrukturen von Greiferfingern*, Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Nguyen Duc 2019

Nguyen Duc, H. (April 2019), *Konzeption und Umsetzung einer Machine Learning Anwendung für mechatronische Greifsysteme*, Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Sarter 2021

Sarter, L. (Februar 2021), *Entwicklung anwendungsgerechter Greiferfinger für die Batteriezellenmontage*, Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Schabel 2021

Schabel, S. (April 2021), *Schnittstellengestaltung für die Synthese eines modularen Greiferfingerbaukastens*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Seiter 2019

Seiter, M. (August 2019), *Entwicklung einer Smartphone Applikation für mechatronische Greifsysteme*, Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Wang 2018

Wang, L. (Juli 2018), *Entwicklung und Erprobung einer kamerabasierten Robotersteuerung für das autonome, mobile Greifen und Handhaben von Werkstückträgern*, Masterthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Wang 2020

Wang, Z. (Januar 2020), *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konventioneller, individueller und modularer Greiferfinger*, Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

AbuSalim et al. 2020

AbuSalim, S. W.G., Ibrahim, R., Zainuri Saringat, M., Jamel, S. & Abdul Wahab, J. (2020), „Comparative Analysis between Dijkstra and Bellman-Ford Algorithms in Shortest Path Optimization“, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 917(1), DOI: 10.1088/1757-899X/917/1/012077.

Ali et al. 2019

Ali, M. H., Zhanabayev, A., Khamzhin, S. & Mussin, K. (2019), „Biologically Inspired Gripper Based on the Fin Ray Effect“, *2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, IEEE, S. 865–869, DOI: 10.1109/ICCAR.2019.8813388.

Amend et al. 2016

Amend, J., Cheng, N., Fakhouri, S. & Culley, B. (2016), „Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product“, *Soft robotics*, 3(4), S. 213–222, DOI: 10.1089/soro.2016.0021.

Andreasen 1980

Andreasen, M. M. (1980), *Syntesemetoder på systemgrundlag*, Dissertation, Lund Institute of Technology, Lund.

Andrussow et al. 2023

Andrussow, I., Sun, H., Kuchenbecker, K. J. & Martius, G. (2023), „Minsight: A Fingertip-Sized Vision-Based Tactile Sensor for Robotic Manipulation“, *Advanced Intelligent Systems*, 5(8), S. 1–10, DOI: 10.1002/aisy.202300042.

Asheber & Lin 2015

Asheber, W. T. & Lin, C. Y. (2015), „Mechatronics Design of Intelligent Robotic Gripper“, *Key Engineering Materials*, 649, S. 14–21, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.649.14.

Azim, Lobov & Pastukhov 2019

Azim, M. S., Lobov, A. & Pastukhov, A. (2019), „Methodology for implementing universal gripping solution for robot application“, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 68(4), S. 413, DOI: 10.3176/proc.2019.4.11.

Backer et al. 2018

Backer, K. de, DeStefano, T., Menon, C. & Suh, J. R., *Industrial robotics and the global organisation of production*, Paris, https://www.oecd.org/en/publications/industrial-robotics-and-the-global-organisation-of-production_dd98ff58-en.html [25.03.2025].

Barg 2018

Barg, S. (2018), *Kontextbezogene Auslegung von Produktbaukästen*, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Apprimus Verlag, Aachen, ISBN: 978-3-86359-615-6.

Bartenschlager, Hebel & Schmidt 1998

Bartenschlager, J., Hebel, H. & Schmidt, G. (1998), *Handhabungstechnik mit Robotertechnik*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN: 978-3-663-12166-4.

Bauer 2002

Bauer, F. (2002), *Maßnahmen und Methoden zur Flexibilisierung pneumatischer Greifsysteme*, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-832-20539-3.

Belter et al. 2013

Belter, J. T., Segil, J. L., Dollar, A. M. & Weir, R. F. (2013), „Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review“, *Journal of rehabilitation research and development*, 50(5), S. 599–618, DOI: 10.1682/jrrd.2011.10.0188.

Bicchi 1995

Bicchi, A. (1995), „On the Closure Properties of Robotic Grasping“, *The International Journal of Robotics Research*, 14(4), S. 319–334, DOI: 10.1177/027836499501400402.

Birglen 2019

Birglen, L. (2019), „Design of a partially-coupled self-adaptive robotic finger optimized for collaborative robots“, *Autonomous robots*, 43(2), S. 523–538, DOI: 10.1007/s10514-018-9802-x.

Birglen, Laliberté & Gosselin 2008

Birglen, L., Laliberté, T. & Gosselin, C. (2008), *Underactuated Robotic Hands*, Springer, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-77459-4.

Birglen & Schlicht 2018

Birglen, L. & Schlicht, T. (2018), „A statistical review of industrial robotic grippers“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, S. 88–97, DOI: 10.1016/j.rcim.2017.05.007.

Blackenfelt 2001

Blackenfelt, M. (2001), *Managing complexity by product modularisation*, Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden.

Blanes, Mellado & Beltran 2014

Blanes, C., Mellado, M. & Beltran, P. (2014), „Novel Additive Manufacturing Pneumatic Actuators and Mechanisms for Food Handling Grippers“, *Actuators*, 3(3), S. 205–225, DOI: 10.3390/act3030205.

Blazek 2023

Blazek, P. (2023), Creating Customization Experiences: The Evolution of Product Configurators. In T. Aichner & F. Salvador (Hrsg.). *Mass Customization and Customer Centricity* (Bd. 50, S. 179–209), Springer International Publishing, Cham, DOI: 10.1007/978-3-031-09782-9_7.

Blees 2011

Blees, C. (2011), *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*, Dissertation, Technische Universität Hamburg, TuTech-Verlag, Hamburg, ISBN: 9783941492356.

Börjesson 2009

Börjesson, F. (2009), „Improved Output in Modular Function Deployment Using Heuristics“, *17th International Conference on Engineering Design (ICED'09)*, Design Society, S. 1–12.

Börjesson 2012

Börjesson, F. (2012), *Approaches to modularity in product architecture*, Lizentiatsarbeit, Department of Machine Design, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, ISBN: 978-91-7501-390-9.

Borst, Fischer & Hirzinger 2003

Borst, C., Fischer, M. & Hirzinger, G. (2003), „Grasping the dice by dicing the grasp“, *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, S. 3692–3697, DOI: 10.1109/IROS.2003.1249729.

Brandenburg, Smolka & Diltthey 2004

Brandenburg, A., Smolka, G. & Diltthey, U. (2004), „Assembly of hybrid micro-systems – the SFB 440“, *Microsystem Technologies*, 10(3), S. 247–251, DOI: 10.1007/s00542-003-0366-z.

Brost & Peters 1996

Brost, R. C. & Peters, R. R. (1996), „Automatic design of 3-d fixtures and assembly pallets“, *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, S. 495–502, DOI: 10.1109/ROBOT.1996.503824.

Brown & Brost 1997

Brown, R. G. & Brost, R. C. (1997), „A 3D modular gripper design tool“, *1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, S. 2332–2339, DOI: 10.1109/ROBOT.1997.619310.

Brown & Brost 1999

Brown, R. G. & Brost, R. C. (1999), „A 3-D modular gripper design tool“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(1), S. 174–186, DOI: 10.1109/70.744612.

Brylowski et al. 2020

Brylowski, M., Ludwig, M., Kersten, W. & Schultze, W. (2020), „Product modularization in Integrated supply chains: a product life-cycle phase specific concept for effect allocation“, *14. Hamburg International Conference of Logistic (HICL) 2020*, epubli, S. 25–76, DOI: 10.15480/882.3108.

Capsi-Morales et al. 2021

Capsi-Morales, P., Piazza, C., Catalano, M. G., Grioli, G., Schiavon, L., Fiaschi, E. & Bicchi, A. (2021), „Comparison between rigid and soft poly-articulated prosthetic hands in non-expert myo-electric users shows advantages of soft robotics“, *Scientific reports*, 11, 23952, S. 1–15, DOI: 10.1038/s41598-021-02562-y.

Carbone 2013

Carbone, G. (2013), *Grasping in Robotics*, Springer, London, ISBN: 978-1-4471-4664-3.

Causey 1999

Causey, G. C. (1999), *Elements of agility in manufacturing*, Dissertation, Case Western Reserve University, Cleveland.

Causey & Quinn 1998

Causey, G. C. & Quinn, R. D. (1998), „Gripper design guidelines for modular manufacturing“, *1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, S. 1453–1458, DOI: 10.1109/ROBOT.1998.677309.

Ceccarelli, Tavolieri & Lu 2006

Ceccarelli, M., Tavolieri, C. & Lu, Z. (2006), „Design Considerations for Underactuated Grasp with a one D.O.F. Anthropomorphic Finger Mechanism“, *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, S. 1611–1616, DOI: 10.1109/IROS.2006.282051.

Chaudhari & Shinde 2014

Chaudhari, N. & Shinde, V. B. (2014), „Recent Trends in Robotic End of Arm Tooling (Gripper)“, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(2), S. 171–180, DOI: 10.18178/ijmerr.

Chen & Burdick 1993

Chen, I.-M. & Burdick, J. W. (1993), „Finding antipodal point grasps on irregularly shaped objects“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(4), S. 507–512, DOI: 10.1109/70.246063.

Chen, Zhao & Chow 2015

Chen, W., Zhao, S. & Chow, S. L. (2015), Grippers and End-Effectors. In A. Y. C. Nee (Hrsg.). *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology* (Bd. 50, S. 2035–2070), Springer, London, DOI: 10.1007/978-1-4471-4670-4_96.

Crooks et al. 2016

Crooks, W., Vukasin, G., O’Sullivan, M., Messner, W. & Rogers, C. (2016), „Fin Ray® Effect Inspired Soft Robotic Gripper: From the RoboSoft Grand Challenge toward Optimization“, *Frontiers in Robotics and AI*, 3, S. 465–473, DOI: 10.3389/frobt.2016.00070.

Cutkosky & Wright 1986

Cutkosky, M. R. & Wright, P. K. (1986), „Friction, Stability and the Design of Robotic Fingers“, *The International Journal of Robotics Research*, 5(4), S. 20–37, DOI: 10.1177/027836498600500402.

DIN EN ISO 8373:2010-06

DIN EN ISO 8373 (2010), *Roboter und Robotikgeräte – Wörterbuch*, DIN Media GmbH, Berlin, ICS 01.040.25; 25.040.30.

Eilmus 2016

Eilmus, S. (2016), *Methodische Unterstützung der Entwicklung von Produktprogrammen mit hoher Kommunalität*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, ISBN: 978-3-946094-11-1.

Eliuk et al. 2008

Eliuk, W. W., Rob, R. H., Jones, R. L. & Deck, D. (2008), *Gripper Device*, Patentschrift. Vereinigte Staaten von Amerika, Patentnummer: US 8271138 B2.

El-Khoury & Sahbani 2009

El-Khoury, S. & Sahbani, A. (2009), „On computing robust n-finger force-closure grasps of 3D objects“, *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, S. 2480–2486, DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152272.

Engelberger 1983

Engelberger, J. F. (1983), *Robotics in Practice*, Springer, Boston, ISBN: 978-0-85038-669-1.

Erixon 1998

Erixon, G. (1998), *Modular function deployment*, Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, ISBN: 978-9-92573-605-8.

Farrow, Li & Correll 2016

Farrow, N., Li, Y. & Correll, N. (2016), „Morphological and Embedded Computation in a Self-contained Soft Robotic Hand“, *arXiv preprint*, 2016, S. 1–10, DOI: 10.48550/arXiv.1605.00354.

Feldmann 2014

Feldmann, K. (2014), *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*, (2. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-43656-5.

Ferrari & Canny 1992

Ferrari, C. & Canny, J. (1992), „Planning optimal grasps“, *1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, S. 2290–2295, DOI: 10.1109/ROBOT.1992.219918.

Foletto, Friedrich & Gupta 2013

Foletto, A., Friedrich, A. & Gupta, S. (2013), *Analysis of Hall-Effect System with Two Linear Sensor ICs for 30 mm Displacement*, <https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296097-hall-effect-system-with-two-linear-sensor-ics.pdf> [28.03.2025].

Forza & Salvador 2002

Forza, C. & Salvador, F. (2002), „Managing for variety in the order acquisition and fulfilment process: The contribution of product configuration systems“, *International Journal of Production Economics*, 76(1), S. 87–98, DOI: 10.1016/S0925-5273(01)00157-8.

Francalanza, Mercieca & Fenech 2018

Francalanza, E., Mercieca, M. & Fenech, A. (2018), „Modular System Design Approach for Cyber Physical Production Systems“, *Procedia CIRP*, 72, S. 486–491, DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.090.

Friedmann et al. 2022

Friedmann, M., Schabel, S., Gerber, J., Döhring, A., Meschter, L., Fleischer, J. & May, M. (2022), „Greiferfinger für eine schnelle Rekonfiguration“, *wt Werkstattstechnik online*, 112(9), S. 629–634, DOI: 10.37544/1436-4980-2022-09-101.

Friedmann et al. 2023

Friedmann, M., Klüpfel, D., Frech, C., Liu, M., Hauf, J., Li, G., Friedrich, C. & Fleischer, J. (2023), „Automated Configuration of Gripper Fingers from a Construction Kit for Robotic Applications“, *Machines*, 11(8), S. 1–25, DOI: 10.3390/machines11080804.

Friedmann & Fleischer 2022

Friedmann, M. & Fleischer, J. (2022), „Automated Configuration of Modular Gripper Fingers“, *Procedia CIRP*, 106, S. 70–75, DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.157.

Friedrich, Friedmann & Fleischer 2021

Friedrich, C., Friedmann, M. & Fleischer, J. (2021), *Modular Gripping Finger, Gripping Device and Construction Kit*, Patentschrift. Vereinigte Staaten von Amerika, Patentnummer: US 12097612.

Gerez, Gao & Liarokapis 2019

Gerez, L., Gao, G. & Liarokapis, M. (2019), „Employing Magnets to Improve the Force Exertion Capabilities of Adaptive Robot Hands in Precision Grasps“, *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, S. 7630–7635, DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967939.

Göpfert 1998

Göpfert, J. (1998), *Modulare Produktentwicklung*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8244-6827-0.

Grimske 2014

Grimske, S. (2014), *Multifunktionale Schnittstellen für kleine modulare Werkzeugmaschinen*, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität, Shaker Verlag, Aachen, ISBN: 978-3-8440-3025-9.

Ha, Agrawal & Song 2020

Ha, H., Agrawal, S. & Song, S. (2020), „Fit2Form: 3D Generative Model for Robot Gripper Form Design“, *4th Conference on Robot Learning (CoRL)*, DOI: 10.48550/arXiv.2011.06498.

Haberhauer 2018

Haberhauer, H. (2018), *Maschinenelemente*, (18. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-53048-1.

Harada et al. 2011

Harada, K., Tsuji, T., Nagata, K., Yamanobe, N., Maruyama, K., Nakamura, A. & Kawai, Y. (2011), „Grasp planning for parallel grippers with flexibility on its grasping surface“, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, S. 1540–1546, DOI: 10.1109/ROBIO.2011.6181508.

Haug, Hvam & Mortensen 2011

Haug, A., Hvam, L. & Mortensen, N. H. (2011), „The impact of product configurators on lead times in engineering-oriented companies“, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 25(2), S. 197–206, DOI: 10.1017/S0890060410000636.

Heinrich, Linke & Glöckler 2017

Heinrich, B., Linke, P. & Glöckler, M. (2017), *Grundlagen Automatisierung*, (2. Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-17582-5.

Hering & Schloske 2022

Hering, E. & Schloske, A. (2022), *Quality Function Deployment (QFD)*, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-662-64811-7.

Hesse 2011

Hesse, S. (2011), *Greiftechnik*, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-42422-7.

Hesse 2020

Hesse, S. (2020), *Grundlagen der Handhabungstechnik*, (5. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-46359-2.

Hesse & Malisa 2016

Hesse, S. & Malisa, V. (2016), *Taschenbuch Robotik, Montage, Handhabung*, (2. Auflage), Fachbuchverlag Leipzig, München, ISBN: 978-3-446-44549-9.

Hevner et al. 2004

Hevner, A. R., March, S. T., Park, J. & Ram, S. (2004), „Design Science in Information Systems Research“, *MIS Quarterly*, 28(1), S. 75–105, DOI: 10.2307/25148625.

Honarpardaz et al. 2016

Honarpardaz, M., Tarkian, M., Sirkett, D., Ölvander, J., Feng, X., Elf, J. & Sjögren, R. (2016), „Generic Automated Multi-function Finger Design“, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 157, S. 1–9, DOI: 10.1088/1757-899X/157/1/012015.

Honarpardaz et al. 2017

Honarpardaz, M., Tarkian, M., Sirkett, D., Ölvander, J. & Feng, X. (2017), „Finger design automation for industrial robot grippers: A review“, *Robotics and Autonomous Systems*, 87, S. 104–119, DOI: 10.1016/j.robot.2016.10.003.

Honarpardaz 2018

Honarpardaz, M. (2018), *Finger Design Automation for Industrial Robots*, Dissertation, Linköping University, Linköping University Electronic Press, Linköping, ISBN: 978-9-176-85343-6.

Honarpardaz, Ölvander & Tarkian 2019

Honarpardaz, M., Ölvander, J. & Tarkian, M. (2019), „Fast finger design automation for industrial robots“, *Robotics and Autonomous Systems*, 113, S. 120–131, DOI: 10.1016/j.robot.2018.12.011.

Hota et al. 2024

Hota, R. K., Liu, G., Decraemer, B., Swevels, B., Burggraeve, S., Verstraten, T., Vanderborght, B. & van de Perre, G. (2024), „Automated Grasp Planning and Finger Design Space Search Using Multiple Grasp Quality Measures“, *Robotics*, 13(74), S. 1–32, DOI: 10.3390/robotics13050074.

Hunziker & Blankenagel 2024

Hunziker, S. & Blankenagel, M. (2024), *Forschungsdesign im Bereich Betriebswirtschaft und Management*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-44859-2.

International Federation of Robotics (2020)

International Federation of Robotics (2020), *IFR Press Conference World Robotics 2020*, Frankfurt, https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf [21.05.2021].

Jiang et al. 2014

Jiang, L., Zeng, B., Fan, S., Sun, K., Zhang, T. & Liu, H. (2014), „A modular multi-sensory prosthetic hand“, *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, IEEE, S. 648–653, DOI: 10.1109/ICInfA.2014.6932734.

Jonas 2014

Jonas, H. (2014), *Eine Methode zur strategischen Planung modularer Produktprogramme*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, TuTech Innovation, Hamburg, ISBN: 978-3-941492-65-3.

Jung & Oh 2013

Jung, T.-J. & Oh, J.-H. (2013), „Design of a Robot Gripper for a Rapid Service Robot“, *IFAC Proceedings Volumes*, 46(5), S. 319–324, DOI: 10.3182/20130410-3-CN-2034.00110.

Kakogawa, Nishimura. Hiroyuki & Ma 2016

Kakogawa, A., Nishimura. Hiroyuki & Ma, S. (2016), „Underactuated modular finger with pull-in mechanism for a robotic gripper“, *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, S. 556–561, DOI: 10.1109/ROBIO.2016.7866381.

Khondoker, Baheri & Sameoto 2019

Khondoker, M. A. H., Baheri, N. & Sameoto, D. (2019), „Tendon-Driven Functionally Gradient Soft Robotic Gripper 3D Printed with Intermixed Extrudate of Hard and Soft Thermoplastics“, *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(4), S. 191–203, DOI: 10.1089/3dp.2018.0102.

Kim et al. 2021

Kim, U., Jung, D., Jeong, H., Park, J., Jung, H.-M., Cheong, J., Choi, H. R., Do, H. & Park, C. (2021), „Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand“, *Nature communications*, 12, 7177, S. 1–13, DOI: 10.1038/s41467-021-27261-0.

Kipp 2012

Kipp, T. (2012), *Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, TuTech Innovation, Hamburg, ISBN: 978-3-941492-47-9.

Koeppen 2008

Koeppen, B. (2008), *Modularisierung komplexer Produkte anhand technischer und betriebswirtschaftlicher Komponentenkopplungen*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Shaker Verlag, Aachen, ISBN: 978-3-83226-979-1.

Kohl, Roth & Lindemann 2016

Kohl, M., Roth, M. & Lindemann, U. (2016), „Safety-oriented Modular Function Deployment“, *NordDesign 2016*, The Design Society, S. 103–114.

Kopenhagen 2004

Kopenhagen, F. (2004), *Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Shaker Verlag, Aachen, ISBN: 978-3-83222-852-1.

Kramberger et al. 2019

Kramberger, A., Wolniakowski, A., Rasmussen, M. H., Munih, M., Ude, A. & Schlette, C. (2019), „Automatic Fingertip Exchange System for Robotic Grasping in Flexible Production Processes“, *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, S. 1664–1669, DOI: 10.1109/COASE.2019.8842911.

Krause & Gebhardt 2018

Krause, D. & Gebhardt, N. (2018), *Methodische Entwicklung Modularer Produktfamilien*, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-53039-9.

Krause, Hartwich & Rennpferdt (2020)

Krause, D., Hartwich, T. S. & Rennpferdt, C. (Hrsg.) (2020), *Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-62393-0.

Krug 2010

Krug, A. (2010), *Entwurf eines integrativen Grundmodells für Produktkonfiguratoren*, Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität, Jena.

Kunz et al. 2015

Kunz, H., Löchte, C., Dietrich, F., Raatz, A., Fischer, F., Dröder, K. & Dilger, K. (2015), „Novel form-flexible handling and joining tool for automated preforming“, *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(2), S. 199–213, DOI: 10.1515/secm-2013-0326.

Kurfess 2005

Kurfess, T. R. (2005), *Robotics and Automation Handbook*, (1. Auflage), CRC Press, Boca Raton, ISBN: 978-0-84931-804-7.

Lachmayer & Lippert 2020

Lachmayer, R. & Lippert, R. B. (2020), *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*, (1. Auflage), Springer, Berlin, ISBN: 978-3-662-59789-7.

Lachmayer, Rettschlag & Kaielerle 2021

Lachmayer, R., Rettschlag, K. & Kaielerle, S. (2021), *Konstruktion für die Additive Fertigung*, Springer, Berlin, ISBN: 978-3-662-63029-7.

Lange & Imsdahl 2014

Lange, M. W. & Imsdahl, A. (2014), Modular Function Deployment: Using Module Drivers to Impart Strategies to a Product Architecture. In T. W. Simpson, J. Jiao, Z. Siddique & K. Hölttä-Otto (Hrsg.). *Advances in Product Family and Product Platform Design* (S. 91–118), Springer, New York, DOI: 10.1007/978-1-4614-7937-6_4.

Lanner & Malmqvist 1996

Lanner, P. & Malmqvist, J. (1996), „An Approach Towards Considering Technical and Economic Aspects in Product Architecture Design“, *2nd WDK Workshop on Product Structuring 1996*, Design Society, S. 1–6.

Latake & Phalle 2014

Latake, V. D. & Phalle, V. M. (2014), „A survey paper on a factors affecting on selection of mechanical gripper“, *International Journal of Engineering Development and Research*, 2(1), S. 47–51.

Laukotka, Seiler & Krause 2020

Laukotka, F., Seiler, F. & Krause, D. (2020), „MBSE als Datenbasis zur Unterstützung von Konfiguratoren und Digitalen Zwillingen modularer Produktfamilien“, *31st Symposium Design for X*, The Design Society, S. 61–70.

Li et al. 2019

Li, C., Gu, X., Xiao, X., Zhu, G., Prituja, A. V. & Ren, H. (2019), „Transcend Anthropomorphic Robotic Grasping With Modular Antagonistic Mechanisms and Adhesive Soft Modulations“, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3), S. 2463–2470, DOI: 10.1109/LRA.2019.2906556.

Li, Gu & Ren 2017

Li, C., Gu, X. & Ren, H. (2017), „A Cable-Driven Flexible Robotic Grasper With Lego-Like Modular and Reconfigurable Joints“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(6), S. 2757–2767, DOI: 10.1109/TMECH.2017.2765081.

Liebisch 2014

Liebisch, M. (2014), *Aspektorientierte Datenhaltung in Produktkonfiguratoren*, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, URN: urn:nbn:de:gbv:27-20140606-095114-4.

Liu et al. 2007

Liu, H., Meusel, P., Seitz, N., Willberg, B., Hirzinger, G., Jin, M. H., Liu, Y. W., Wei, R. & Xie, Z. W. (2007), „The modular multisensory DLR-HIT-Hand“, *Mechanism and Machine Theory*, 42(5), S. 612–625, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.013.

Liu et al. 2008

Liu, H., Wu, K., Meusel, P., Seitz, N., Hirzinger, G., Jin, M. H., Liu, Y. W., Fan, S. W., Lan, T. & Chen, Z. P. (2008), „Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II“, *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, S. 3692–3697, DOI: 10.1109/IROS.2008.4650624.

Liu et al. 2024

Liu, L.-F., Li, T., Lai, Q.-T., Tang, G. & Sun, Q.-J. (2024), „Recent Advances in Self-Powered Tactile Sensing for Wearable Electronics“, *Materials*, 17(11), DOI: 10.3390/ma17112493.

Liu & Carpin 2015

Liu, S. & Carpin, S. (2015), „Fast grasp quality evaluation with partial convex hull computation“, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, S. 4279–4285, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139789.

Liu, Lam & Ding 2004

Liu, Y.-H., Lam, M.-L. & Ding, D. (2004), „A Complete and Efficient Algorithm for Searching 3-D Form-Closure Grasps in the Discrete Domain“, *IEEE Transactions on Robotics*, 20(5), S. 805–816, DOI: 10.1109/TRO.2004.829500.

Lotter, Deuse & Lotter 2016

Lotter, B., Deuse, J. & Lotter, E. (2016), *Die Primäre Produktion*, (1. Auflage), Springer, Berlin, ISBN: 978-3-662-53212-6.

Lundström 1974

Lundström, G. (1974), „Industrial Robot Grippers“, *Industrial Robot: An International Journal*, 1(2), S. 72–82, DOI: 10.1108/eb004449.

Mahler et al. 2016

Mahler, J., Pokorny, F. T., Hou, B., Roderick, M., Laskey, M., Aubry, M., Kohlhoff, K., Kroger, T., Kuffner, J. & Goldberg, K. (2016), „Dex-Net 1.0: A cloud-based network of 3D objects for robust grasp planning using a Multi-Armed Bandit model with correlated rewards“, *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, S. 1957–1964, DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487342.

Mahler et al. 2017

Mahler, J., Liang, J., Niyaz, S., Laskey, M., Doan, R., Liu, X., Ojea, J. A. & Goldberg, K. (2017), „Dex-Net 2.0: Deep Learning to Plan Robust Grasps with Synthetic Point Clouds and Analytic Grasp Metrics“, *Robotics: Science and Systems XIII*, Robotics Science & Systems Foundation, DOI: 10.15607/RSS.2017.XIII.058.

Mahler et al. 2018

Mahler, J., Matl, M., Liu, X., Li, A., Gealy, D. & Goldberg, K. (2018), „Dex-Net 3.0: Computing Robust Robot Vacuum Suction Grasp Targets in Point Clouds using a New Analytic Model and Deep Learning“, *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, S. 5620–5627, DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460887.

Mahler et al. 2019

Mahler, J., Matl, M., Satish, V., Danielczuk, M., DeRose, B., McKinley, S. & Goldberg, K. (2019), „Learning ambidextrous robot grasping policies“, *Science robotics*, 4(26), DOI: 10.1126/scirobotics.aau4984.

Miller & Allen 2004

Miller, A. T. & Allen, P. K. (2004), „Graspl!“ , *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 11(4), S. 110–122, DOI: 10.1109/MRA.2004.1371616.

Mill-Max Mfg. Corp. (2023)

Mill-Max Mfg. Corp. (2023), *Spring Loaded Pin General Application Notes*, Mill-Max Manufacturing Corporation, <https://www.mill-max.com/engineering-note-books/spring-loaded-pogo-pins-connectors> [09.11.2023].

Mishra 1995

Mishra, B. (1995), „Grasp metrics: optimality and complexity“, *Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, A. K. Peters, Ltd., S. 137–165.

Monkman 2007

Monkman, G. J. (2007), *Robot Grippers*, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN: 978-3-527-40619-7.

Nagel, Giese & Becker 2016

Nagel, M., Giese, F. & Becker, R. (2016), Flexible Gripper Design Through Additive Manufacturing. In D. Reinhardt, R. Saunders & J. Burry (Hrsg.). *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (S. 455–459), Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-319-26378-6_37.

Newbury et al. 2023

Newbury, R., Gu, M., Chumbley, L., Mousavian, A., Eppner, C., Leitner, J., Bohg, J., Morales, A., Asfour, T., Kragic, D., Fox, D. & Cosgun, A. (2023), „Deep Learning Approaches to Grasp Synthesis: A Review“, *IEEE Transactions on Robotics*, 39(5), S. 3994–4015, DOI: 10.1109/TRO.2023.3280597.

Newcomb, Bras & Rosen 1998

Newcomb, P. J., Bras, B. & Rosen, D. W. (1998), „Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle“, *Journal of Mechanical Design*, 120(3), S. 483–490, DOI: 10.1115/1.2829177.

Nguyen 1988

Nguyen, V.-D. (1988), „Constructing Force- Closure Grasps“, *The International Journal of Robotics Research*, 7(3), S. 1368–1373, DOI: 10.1177/027836498800700301.

Niehaves 2007

Niehaves, B. (2007), „On Epistemological Diversity in Design Science: New Vistas for a Design-Oriented IS Research?“, *International Conference on Information Systems*, Association for Information Systems, S. 1–13.

Nilsson & Erixon 1998

Nilsson, P. & Erixon, G. (1998), „The Chart of Modular Function Deployment“, *th WDK Workshop on Product Structuring - Design of Product Families*, Delft University of Technology, S. 147–154.

Nof 2010

Nof, S. Y. (2010), *Handbook of industrial robotics*, (2. Auflage), John Wiley, New York, ISBN: 978-0-470172-506.

Pansare, Yadav & Nagare 2023

Pansare, R., Yadav, G. & Nagare, M. R. (2023), „Reconfigurable manufacturing system: a systematic review, meta-analysis and future research directions“, *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(1), S. 228–265, DOI: 10.1108/JEDT-05-2021-0231.

Pedrazzoli, Rinaldi & Bobertoer 2001

Pedrazzoli, P., Rinaldi, R. & Bobertoer, C. R. (2001), „A rule based approach to the gripper selection issue for the assembly process“, *2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001) Assembly and Disassembly in the Twenty-first Century*, IEEE, S. 202–207, DOI: 10.1109/ISATP.2001.928990.

Peppers et al. 2007

Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. & Chatterjee, S. (2007), „A Design Science Research Methodology for Information Systems Research“, *Journal of Management Information Systems*, 24(3), S. 45–77, DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.

Pham, Gourashi & Eldukhri 2007

Pham, D. T., Gourashi, N. S. E.-D. & Eldukhri, E. E. (2007), „Automated configuration of gripper systems for assembly tasks“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(11), S. 1643–1649, DOI: 10.1243/09544054JEM878SC.

Pham & Yeo 1988

Pham, D. T. & Yeo, S. H. (1988), „A knowledge-based system for robot gripper selection: criteria for choosing grippers and surfaces for gripping“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 28(4), S. 301–313, DOI: 10.1016/0890-6955(88)90045-4.

Pham & Yeo 1991

Pham, D. T. & Yeo, S. H. (1991), „Strategies for gripper design and selection in robotic assembly“, *International Journal of Production Research*, 29(2), S. 303–316, DOI: 10.1080/00207549108930072.

PHD Inc. (2020)

PHD Inc. (2020), *Modular Gripper Jaw Tooling: CLICK & GRIP*, Fort Wayne, <https://www.phdinc.com/pdf/CLICK-GRIP.pdf> [09.08.2021].

Pimmler 1994

Pimmler, T. U. (1994), *A development methodology for product decomposition and integration*, Masterarbeit, Massachusetts Institute of Technology.

Pimmler & Eppinger 1994

Pimmler, T. U. & Eppinger, S. D. (1994), Integration Analysis of Product Decompositions. In T. K. Hight (Hrsg.). *Design theory and methodology - DTM '94* (S. 1–9), American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, ISBN: 978-0791812822.

Plietz 2011

Plietz, M. (2011), Patterns in der Produktkonfiguration. In P. Gluchowski (Hrsg.). *Tagungsband zum 14. Interuniversitären Doktorandenseminar Wirtschaftsinformatik* (S. 62–69), Universitätsverlag Chemnitz, Chemnitz, ISBN: 9783941003392.

Pott & Dietz 2019

Pott, A. & Dietz, T. (2019), *Industrielle Robotersysteme*, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-25345-5.

Pugh 1981

Pugh, S. (1981), Concept selection: a method that works. In V. Hubka (Hrsg.). *Results of ICED 81: International Conference on Engineering Design in Rome 1981* (S. 497–506), Ed. Heurista, Zürich, ISBN: 3-85693-007-8.

Qiu & Kermani 2022

Qiu, S. & Kermani, M. R. (2022), „A new approach for grasp quality calculation using continuous boundary formulation of grasp wrench space“, *Mechanism and Machine Theory*, 168, S. 1–18, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104524.

Rahman et al. 2024

Rahman, M., Shahria, T., Sunny, S. H., Khan, M. R., Islam, E., Swapnil, A. A. Z., Bedolla-Martínez, D. & Rahman, M. H. (2024), „Development of a Three-Finger Adaptive Robotic Gripper to Assist Activities of Daily Living“, *Designs*, 8(35), S. 1–18, DOI: 10.3390/designs8020035.

Reinhart, Magaña Flores & Zwicker 2018

Reinhart, G., Magaña Flores, A. & Zwicker, C. (2018), *Industrieroboter*, (1. Auflage), Vogel Communications Group, Würzburg, ISBN: 978-3-8343-3401-5.

Ren et al. 2018

Ren, Z., Kashiri, N., Zhou, C. & Tsagarakis, N. G. (2018), „HERI II: A Robust and Flexible Robotic Hand based on Modular Finger design and Under Actuation Principles“, *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, S. 1449–1455, DOI: 10.1109/IROS.2018.8594507.

Renner 2007

Renner, I. (2007), *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*, Dissertation, Technischen Universität München, Verlag Dr. Hut, München, ISBN: 978-3899635676.

RightHand Robotics, Inc. 2017

RightHand Robotics, Inc. (2017). (29.05.2017), *RightHand Labs: New 2017 ReFlex Robotic Grippers* [Video], YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=4Ku7Q3vEkRw&t=24s>

Ringwald et al. 2023

Ringwald, J., Schneider, S., Chen, L., Knobbe, D., Johannsmeier, L., Swikir, A. & Haddadin, S. (2023), „Towards Task-Specific Modular Gripper Fingers: Automatic Production of Fingertip Mechanics“, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(3), S. 1866–1873, DOI: 10.1109/LRA.2023.3241757.

Roa & Suárez 2015

Roa, M. A. & Suárez, R. (2015), „Grasp quality measures: review and performance“, *Autonomous robots*, 38(1), S. 65–88, DOI: 10.1007/s10514-014-9402-3.

Rubert et al. 2018

Rubert, C., León, B., Morales, A. & Sancho-Bru, J. (2018), „Characterisation of Grasp Quality Metrics“, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 89(3-4), S. 319–342, DOI: 10.1007/s10846-017-0562-1.

Rupp 2021

Rupp, C. (2021), *Requirements-Engineering und -Management*, (7. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-46430-8.

Sahbani, El-Khoury & Bidaud 2012

Sahbani, A., El-Khoury, S. & Bidaud, P. (2012), „An overview of 3D object grasp synthesis algorithms“, *Robotics and Autonomous Systems*, 60(3), S. 326–336, DOI: 10.1016/j.robot.2011.07.016.

Salisbury & Quigley 2013

Salisbury, C. M. & Quigley, M. (2013), *Robotic Hand with Modular Extensions*, Patentschrift. Vereinigte Staaten von Amerika, Patentnummer: US8936290B1.

Salvador 2007

Salvador, F. (2007), „Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization“, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54(2), S. 219–240, DOI: 10.1109/TEM.2007.893996.

Samadikhoshkho, Zareinia & Janabi-Sharifi 2019

Samadikhoshkho, Z., Zareinia, K. & Janabi-Sharifi, F. (2019), „A Brief Review on Robotic Grippers Classifications“, *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, IEEE, S. 1–4, DOI: 10.1109/CCECE.2019.8861780.

Sancho-Bru et al. 2011

Sancho-Bru, J., Pérez-González, A., Mora, M., León, B., Vergara, M., Iserte, J., Rodríguez-Cervantes, P.-J. & Morales, A. (2011), Towards a Realistic and Self-Contained Biomechanical Model of the Hand. In V. Klika (Hrsg.). *Theoretical Biomechanics* (S. 211–240), InTech, London, DOI: 10.5772/19977.

Sanfilippo et al. 2012

Sanfilippo, F., Salvietti, G., Zhang, H. Z., Hildre, H. P. & Prattichizzo, D. (2012), „Efficient modular grasping: An iterative approach“, *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2012)*, IEEE, S. 1281–1286, DOI: 10.1109/BioRob.2012.6290693.

Scalice, Andrade & Forcellini 2008

Scalice, R. K., Andrade, L. F. S. de & Forcellini, F. A. (2008), A Design Methodology for Module Interfaces. In R. Curran, S.-Y. Chou & A. Trappey (Hrsg.). *Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World* (S. 297–304), Springer, London, DOI: 10.1007/978-1-84800-972-1_28.

Schäfer et al. 2019

Schäfer, M., Büsching, M., Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), Safe Human Robot Collision Avoidance with an End-Effector integrated 360° LiDAR System. In T. Schüppstuhl, K. Tracht & J. Roßmann (Hrsg.). *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter* (S. 138–147), Springer, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-59317-2_14.

Schmalz 2018

Schmalz, J. K. B. (2018), *Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen*, Dissertation, Technische Universität München, utzverlag, München, ISBN: 978-3-8316-7492-3.

Schmalz, Kiefer & Behncke 2015

Schmalz, J., Kiefer, L. & Behncke, F. (2015), „Analysis of the System Handling Using Methods of Structural Complexity Management“, *Applied Mechanics and Materials*, 794, S. 27–34, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.794.27.

Schroeffler, Rehekampff & Lueth 2019

Schroeffler, A., Rehekampff, C. & Lueth, T. C. (2019), „An Automated Design Approach for Task-Specific two Finger Grippers for Industrial Applications“, *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, S. 184–189, DOI: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961500.

Schuh (2015)

Schuh, G. (Hrsg.) (2015), *Leitfaden zur Baukastengestaltung*, VDMA Verlag, Stuttgart, ISBN: 978-3-8163-0674-0.

Schuh & Riesener 2018

Schuh, G. & Riesener, M. (2018), *Produktkomplexität managen*, (3. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-45334-0.

Seegräber 1993

Seegräber, L. (1993), *Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter*, expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen, ISBN: 3816909434.

Seguna & Saliba 2001

Seguna, C. M. & Saliba, M. A. (2001), „The mechanical and control system design of a dexterous robotic gripper“, *8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, S. 1195–1201, DOI: 10.1109/ICECS.2001.957430.

Seiler, Schwede & Krause 2019

Seiler, F., Schwede, L.-N. & Krause, D. (2019), MBSE-basierte Produktkonfigurationen zur Analyse der Modularisierung bei der Entwicklung modularer Baukastensysteme. In R. H. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.). *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019, Band 2* (S. 55–70), TUDpress, Dresden, ISBN: 978-3-95908-171-9.

Shao et al. 2021

Shao, G., Ware, H. O. T., Huang, J., Hai, R., Li, L. & Sun, C. (2021), „3D printed magnetically-actuating micro-gripper operates in air and water“, *Additive Manufacturing*, 38(2), S. 101834, DOI: 10.1016/j.addma.2020.101834.

Shimoga 1996

Shimoga, K. B. (1996), „Robot Grasp Synthesis Algorithms: A Survey“, *The International Journal of Robotics Research*, 15(3), S. 230–266, DOI: 10.1177/027836499601500302.

Shintake et al. 2018

Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D. & Shea, H. (2018), „Soft Robotic Grippers“, *Advanced Materials*, 30(29), 1-33, DOI: 10.1002/adma.201707035.

Shufeng, Yue & Wei 2018

Shufeng, T., Yue, Y. U. & Wei, L. (2018), „Structural design and optimization of modular underactuated multi-fingered manipulator“, *2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, IEEE, S. 1028–1036, DOI: 10.1109/ITOEC.2018.8740581.

Siciliano et al. 2009

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. & Oriolo, G. (2009), *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer, London, ISBN: 978-1-84628-641-4.

Siciliano & Khatib (2016)

Siciliano, B. & Khatib, O. (Hrsg.) (2016), *Springer handbook of robotics*, (2. Auflage), Springer, Cham, Schweiz, ISBN: 978-3-319-32550-7.

Spallek 2024

Spallek, J. (2024), *Design for Mass Adaptation*, Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-69590-6.

Stake 2000

Stake, R. (2000), *On conceptual development of modular products - Development of supporting tools for the modularisation process*, Dissertation, KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Stockholm.

Steffen 2007

Steffen, D. (2007), *Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme*, Dissertation, Heinz-Nixdorf-Institut, Paderborn, ISBN: 978-3-939350-26-2.

Steward 1981

Steward, D. V. (1981), „The design structure system: A method for managing the design of complex systems“, *IEEE Transactions on Engineering Management*, EM-28(3), S. 71–74, DOI: 10.1109/TEM.1981.6448589.

Stone 1997

Stone, R. B. (1997), *Towards a Theory of Modular Design*, Dissertation, The University of Texas, Austin.

Suh 1989

Suh, N. P. (1989), *The principles of design*, Oxford University Press, New York, ISBN: 978-0-19-504345-7.

Syska 2006

Syska, A. (2006), *Produktionsmanagement*, Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8349-0235-1.

Tai et al. 2016

Tai, K., El-Sayed, A.-R., Shahriari, M., Biglarbegian, M. & Mahmud, S. (2016), „State of the Art Robotic Grippers and Applications“, *Robotics*, 5(2), S. 1–20, DOI: 10.3390/robotics5020011.

Thebeau 2001

Thebeau, R. E. (2001), *Knowledge management of system interfaces and interactions from product development processes*, Masterarbeit, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Vereinigte Staaten von Amerika.

Tzafestas 1988

Tzafestas, S. G. (1988), „Integrated sensor-based intelligent robot system“, *IEEE Control Systems Magazine*, 8(2), S. 61–72, DOI: 10.1109/37.1876.

Vagaš & Varga 2013

Vagaš, M. & Varga, J. (2013), „Design of Modular Gripper for Industrial Robot“, *Applied Mechanics and Materials*, 436, S. 351–357, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.436.351.

VDI 2860:1990-05

VDI 2860 (1990), *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, DIN Media GmbH, Berlin, DK 621.757:62-18(083.71):003.62;62-771:658.286.2:621.86(083.132).

VDI 2740:1995-04

VDI 2740 (1995), *Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik; Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter*, DIN Media GmbH, Berlin, 25.040.30.

VDI 3405:2014-12

VDI 3405 (2014), *Additive Fertigungsverfahren; Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*, DIN Media GmbH, Berlin, 25.030.

Velasco 1997

Velasco, V. (1997), *A methodology for computer-assisted gripper customization using rapid prototyping technology*, Dissertation, Case Western Reserve University, Cleveland.

Vittor et al. 2011

Vittor, T., Staab, H., Breisch, S., Soetebier, S., Stahl, T., Hackbarth, A. & Kock, S. (2011), „A flexible robotic gripper for automation of assembly tasks: A technology study on a gripper for operation in shared human environments“, *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/ISAM.2011.5942352.

Wallack & Canny 1997

Wallack, A. S. & Canny, J. F. (1997), „Planning for Modular and Hybrid Fixtures“, *Algorithmica*, 19(1), S. 40–60, DOI: 10.1007/PL00014420.

Wang et al. 2021

Wang, D., Xiong, Y., Zi, B., Qian, S., Wang, Z. & Zhu, W. (2021), „Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms“, *Mechanism and Machine Theory*, 155, S. 1–17, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104092.

Weiss & Woern 2004

Weiss, K. & Woern, H. (2004), „Development of a modular anthropomorphic robot hand using servohydraulic actuators“, *2004 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, IEEE, S. 64–76, DOI: 10.1109/ICHR.2004.1442114.

Weiss Robotics GmbH & Co. KG (2019)

Weiss Robotics GmbH & Co. KG (2019), *GRiPKIT by Weiss Robotics: Smarte Greiflösungen für Cobots*, https://jk.de/media/96/45/f7/1718316843/GRIPKIT_Datenblatt.pdf?ts=1718316843 [30.01.2022].

Weiss Robotics GmbH & Co. KG (2024)

Weiss Robotics GmbH & Co. KG (2024), *FINGERKIT System 16 Anleitung*, https://weiss-robotics.com/de/accessories/fingerkit/system16/?file=files/downloads/fingerkit/um_fk-16-starter.pdf&cid=12702 [21.07.2025].

Wettels, Fishel & Loeb 2014

Wettels, N., Fishel, J. A. & Loeb, G. E. (2014), Multimodal Tactile Sensor. In R. Balasubramanian & V. J. Santos (Hrsg.). *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development* (Bd. 95, S. 405–429), Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-319-03017-3_19.

Whitesides 2018

Whitesides, G. M. (2018), „Soft-Robotik“, *Angewandte Chemie*, 130(16), S. 4336–4353, DOI: 10.1002/ange.201800907.

Wolf & Schunk 2016

Wolf, A. & Schunk, H. (2016), *Greifer in Bewegung*, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-43993-1.

Wolf & Schunk (2018)

Wolf, A. & Schunk, H. (Hrsg.) (2018), *Grippers in Motion*, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-1-56990-714-6.

Wolniakowski et al. 2014

Wolniakowski, A., Miatliuk, K., Krüger, N. & Rytz, J. (2014), Automatic Evaluation of Task-Focused Parallel Jaw Gripper Design. In D. Brugali, J. Broenink, T. Kroeger & B. Macdonald (Hrsg.). *SIMPAR 2014: Proceedings of the 4th International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots* (Bd. 8810, S. 450–461), Springer, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-319-11900-7_38.

Wolniakowski et al. 2018

Wolniakowski, A., Gams, A., Kiforenko, L., Kramberger, A., Chrysostomou, D., Madsen, O., Miatliuk, K., Petersen, H. G., Hagelskjær, F., Buch, A. G., Ude, A. & Krüger, N. (2018), „Compensating Pose Uncertainties through Appropriate Gripper Finger Cutouts“, *Acta Mechanica et Automatica*, 12(1), S. 78–83, DOI: 10.2478/ama-2018-0013.

Wolniakowski et al. 2020

Wolniakowski, A., Lindvig, A., Iversen, N., Krüger, N. & Kramberger, A. (2020), „Robotic Finger Design Workflow for Adaptable Industrial Assembly Tasks“, *International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems*, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, S. 69–76, DOI: 10.5220/0010020100690076.

Wolter, Volz & Woo 1985

Wolter, J. D., Volz, R. A. & Woo, A. C. (1985), „Automatic generation of gripping positions“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15(2), S. 204–213, DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313350.

Xu, Kumar & Todorov 2013 - 2013

Xu, Z., Kumar, V. & Todorov, E. (2013 - 2013), „A low-cost and modular, 20-DOF RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2013), IEEE, S. 368–375, DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2013.7030001.

Yang, Lancaster & Smith 2017

Yang, B., Lancaster, P. & Smith, J. R. (2017), „Pre-touch sensing for sequential manipulation“, *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, S. 5088–5095, DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989594.

Zhou et al. 2020

Zhou, J., Chen, Y., Hu, Y., Wang, Z., Li, Y., Gu, G. & Liu, Y. (2020), „Adaptive Variable Stiffness Particle Phalange for Robust and Durable Robotic Grasping“, *Soft robotics*, 7(6), S. 743–757, DOI: 10.1089/soro.2019.0089.

13 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2-1: Teile eines Handhabungssystems mit mechanischem Greifer in Schnittdarstellung (eigene Darstellung in Anlehnung an Hesse, 2020, S. 343; Reinhart, Magaña Flores & Zwicker, 2018, S. 27) 15
- Abbildung 2-2: Der Fin Ray Effect[®] zeigt sich bei Einwirkung einer Kraft auf die abgebildete Struktur, indem sich die Seiten der Struktur verbiegen, wodurch sich die Basis und die Spitze in entgegengesetzter Richtung zur Krafteinwirkung verformen. 20
- Abbildung 2-3: Übersicht unterschiedlicher Greiferfingerarten (eigene und veränderte Darstellung nach (Friedmann et al., 2023, S. 2)) 22
- Abbildung 2-4: Ausprägungen rekonfigurierbarer Greiferfinger in Form von Lochplatten mit positionierbaren Stiften (a) und als Finger mit verstellbaren Gelenken 23
- Abbildung 2-5: Weiss Robotics FiNGERKIT mit drei beispielhaften Fingerpaaren und Benennung der einzelnen Module 25
- Abbildung 2-6: Fingerkontaktmodelle (eigene und veränderte Darstellung nach (Sancho-Bru et al., 2011, S. 218)) 28
- Abbildung 2-7: Möglichkeit zur Überprüfung der Griffeigenschaften mittels *GWS*. Liegt der Ursprung des Objekts innerhalb des *GWS*, so ist der Griff kraftschlüssig. Bei den hier dargestellten Griffen ist nur der zweite von links nicht kraftschlüssig. 30
- Abbildung 2-8: Anwendung des Ballkriteriums auf die vier Objekte. Der Radius des Balls wird vom Ursprung aus vergrößert bis die Balloberfläche den äußeren Rand des *GWS* berührt. Der Radius bestimmt die Qualität des Griffs. 32
- Abbildung 2-9: Regelbasierter Greiferfingerentwurf in sechs Schritten nach (Pedrazzoli, Rinaldi & Bobertoer, 2001) 34
- Abbildung 2-10: Ablauf des Generic Optimized Finger Design (eigene Darstellung nach (Honarpardaz, 2018, S. 27)) 36
- Abbildung 2-11: Beispiel einer Design Structure Matrix (eigene und veränderte Darstellung nach (Krause & Gebhardt, 2018, S. 188)) 47

Abbildung 2-12: Vorgehen der Methode der variantengerechten Produktgestaltung nach Kipp (eigene und veränderte Darstellung nach (Kipp, 2012, S. 74))	50
Abbildung 2-13: Abstrakte Darstellung des Variety Allocation Models nach Kipp (2012) (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 41))	51
Abbildung 2-14: Systematik zur Abbildung der Varianz von Teilfunktionen (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 46))	52
Abbildung 2-15: Darstellung der Karten auf den verschiedenen Ebenen des VAM (von oben nach unten)	53
Abbildung 2-16: Vorgehensweise der Modular Function Deployment nach (Erixon, 1998, S. 65)	55
Abbildung 2-17: House of Quality (eigene Darstellung in Anlehnung an (Hering & Schloske, 2022))	56
Abbildung 2-18: Zielsetzung des Integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien (eigene Darstellung in Anlehnung an (Krause & Gebhardt, 2018, S. 216))	60
Abbildung 2-19: Arbeitsschritte der Lebensphasenmodularisierung (eigene Darstellung in Anlehnung an (Blees, 2011, S. 67))	61
Abbildung 3-1: Der Aufbau und die Vorgehensweise ist an das Vorgehensmodell des Design Science Research angelehnt (eigene und veränderte Darstellung nach (Peppers et al., 2007, S. 54))	66
Abbildung 4-1: Übersicht über den Gesamtablauf der Methode	71
Abbildung 5-1: Ablauf der Baukastengestaltung	73
Abbildung 5-2: Vorgehen der Anforderungsanalyse	75
Abbildung 5-3: FunktionsMASTER ohne Bedingung als Schablone zur einheitlichen Formulierung von Anforderungen (eigene und veränderte Darstellung nach (Rupp, 2021, S. 361))	76
Abbildung 5-4: Vorgehen zur Modularisierung	77
Abbildung 5-5: Vorgehen zur Schnittstellengestaltung	79
Abbildung 5-6: Vorgehen zur Steigerung der Variantengerechtheit	80
Abbildung 6-1: Ablauf der Fingerkonfiguration	83

Abbildung 6-2: Ablauf der Greifpositionsbestimmung (eigene und veränderte Darstellung nach (Friedmann et al., 2023, S. 7))	85
Abbildung 6-3: Überprüfung der Winkel zwischen den Normalenvektoren von Greifpunkten auf gegenüberliegenden Oberflächen eines Objekts (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Liu, 2021, S. 44))	86
Abbildung 6-4: Visualisierung der besten fünf Greifpositionen an einem Quader einmal unter der alleinigen Berücksichtigung der Griffqualitätskriterien (a) und unter Berücksichtigung von Greifpositionen auf unterschiedlichen Seiten des Objekts (b)	87
Abbildung 6-5: kinematische Modulbeschreibung zur Beschreibung der relativen Lage des Ausgangskoordinatensystems B zum Eingangskoordinatensystem A eines Moduls (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 30))	91
Abbildung 6-6: Greiferkoordinatensystem G mit dem Ursprung auf der Anschlussebene der Greiferfinger und der Orientierung der x-Achse in Greifrichtung	92
Abbildung 6-7: Aufbau der kinematischen Kette mit Beispielmodulen	94
Abbildung 6-8: Zulässige Kombinationen aus Auskrägung und Fingerlänge	96
Abbildung 6-9: Hüllkurve H für ein Modul, die mithilfe der Eckpunkte beschrieben wird	97
Abbildung 6-10: Mögliche Kollisionen der Finger untereinander (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 39))	97
Abbildung 6-11: Restriktionen bei der Orientierung der Fingerspitze (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 42))	98
Abbildung 6-12: Ermittlung der Vorzugsorientierung und Neuorientierung eines Objekts (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 46))	100
Abbildung 6-13: Ablauf der Konfiguration für jeweils ein Handhabungsobjekt (eigene und veränderte Darstellung nach (Friedmann et al., 2023, S. 9))	102
Abbildung 7-1: Ablauf der Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen	103
Abbildung 7-2: Erforderliche Greifkraft während eines Handhabungszyklus (eigene Darstellung nach (Hesse, 2011, S. 40))	104

Abbildung 7-3: Beispiel für die Rekonfiguration von einer Startkonfiguration in eine Zielkonfiguration	108
Abbildung 7-4: Übereinstimmende Modulsequenzen zwischen zwei Greiferfingerkonfigurationen (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 44))	108
Abbildung 7-5: Zusammenfassung von gleichbleibenden Modulsequenzen in eigenständige Module (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 44))	109
Abbildung 7-6: Vier Teilschritte einer Rekonfiguration (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 44–45))	109
Abbildung 7-7: Graphische Darstellung des Optimierungsproblems (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 47))	114
Abbildung 7-8: Graphische Darstellung des Optimierungsproblems für Algorithmen (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 51))	116
Abbildung 7-9: Aufbau des Graphen bei zyklischem Anwendungsfall, d.h. bei sich wiederholender Rekonfiguration zur Handhabung einer immer wiederkehrenden Handhabungsobjektfolgenfolge (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Frech, 2023, S. 52))	117
Abbildung 7-10: Ablauf der Bewertung von Greiferfingerkonfigurationen	118
Abbildung 8-1: Zitationsnetzwerk ausgehend von Causey (1998)	123
Abbildung 8-2: Ausgefüllte Design Structure Matrix	127
Abbildung 8-3: Ergebnisse der Clusterbildung nach Anwendung des IGTA	129
Abbildung 8-4: Schnittstellenübersicht des Greifergesamtsystems (Eigene Darstellung in Anlehnung an (A_Schabel, 2021, S. 25))	130
Abbildung 8-5: Mechanische Schnittstellenkonzepte MSK 1 bis MSK 8	132
Abbildung 8-6: Querschnittsflächen der acht Schnittstellenkonzepte	135
Abbildung 8-7: Biegeverlauf eines idealisierten, nicht modularen Greiferfingers (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Schabel, 2021, S. 34))	137
Abbildung 8-8: Vergleich der FEM-Simulationsergebnisse eines Greiferfingers aus Modulen mit dem MSK1 mit einem Referenzfinger gleicher Länge	138

Abbildung 8-9: Federkontaktpin mit Komponenten	141
Abbildung 8-10: Kombinationsraum für den Baukasten bei beiden betrachteten Greifermodellen SCHUNK EGI 80 (a) und SCHUNK EGL 90 (b)	144
Abbildung 8-11: Weiss Robotics FiNGERKIT System 16 Starterset	145
Abbildung 8-12: Ausschnitt aus dem Merkmalsbaum des Baukastens FiNGERKIT (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 42))	146
Abbildung 8-13: Verwendeten Maße Fingerlänge (a), Auskrägung (b) und Öffnungsweite (c)	147
Abbildung 8-14: Umsatzorientierte Funktionsstruktur der Greiferfinger aus dem FiNGERKIT-Baukasten (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 47))	149
Abbildung 8-15: Funktionskarten auf der zweiten Ebene des VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 47))	150
Abbildung 8-16: Karten für variante Wirkelemente bilden die dritten Ebene des VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 48))	150
Abbildung 8-17: Komponentenkarten auf der vierten Ebene des VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 50))	151
Abbildung 8-18: VAM des Weiss Robotics FiNGERKIT (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 51))	154
Abbildung 8-19: Ebene 1 mit ergänzten Unterscheidungsmerkmalen	155
Abbildung 8-20: Umsatzorientierte Funktionsstruktur des neuen Baukastens VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 55))	156
Abbildung 8-21: Ebene 2 mit ergänzten Funktionskarten VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 55–56))	157
Abbildung 8-22: Ebene 3 mit ergänzten Wirkprinzipkarten VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 56))	157
Abbildung 8-23: Ebene 4 mit ergänzten Komponentenkarten (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 57))	158
Abbildung 8-24: Vergleich des initialen mit dem optimierten VAM (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 83))	159

Abbildung 8-25: Explosionsansicht Modultyp B	161
Abbildung 8-26: Modultyp A für die betrachteten Greifermodelle	162
Abbildung 8-27: Versuchsaufbau zum Test der Schnittstelle zwischen Greifer und Grundbacke (eigene Darstellung mit Aufnahmen entnommen aus (A_Schabel, 2021))	162
Abbildung 8-28: Varianten des Modultyp B	163
Abbildung 8-29: Platzverhältnisse innerhalb der abgewinkelten Module am Beispiel von Modultyp C_1 (a) und Modultyp C_3 (b)	164
Abbildung 8-30: Verlauf der Magnetfeldstärke bei Positionsverschiebung des Dauermagneten (eigene und veränderte Darstellung nach (Foletto, Friedrich & Gupta, 2013, S. 1))	165
Abbildung 8-31: Aufbau des Kraftsensors	166
Abbildung 8-32: Explosionsansicht der Fingerspitze mit Kraftsensorik	167
Abbildung 8-33: Explosionsansicht der Fingerspitze mit Distanzsensorik	168
Abbildung 8-34: Aufgezeichnete Messwerte und Vergleich mit Sollwerten	169
Abbildung 8-35: Versuchsaufbau zum Test des Kraftsensors in der Fingerspitze. Über eine fixierte Mutter wird eine M6 Schraube geschraubt. In vollen Umdrehungen verschiebt die Schraube die Wirkfläche der Fingerspitze entgegen der Feder. Der Magnet bewegt sich horizontal über die Hallsensoren	169
Abbildung 8-36: Überblick über die Module des Baukastens	170
Abbildung 8-37: Visualisierung der fünf besten Greifpositionen an unterschiedlichen Seiten für je ein Objekt des Handhabungsobjektspektrums	174
Abbildung 8-38: Beispielhafte Konfigurationen für je ein Objekt je Handhabungsobjekttyp des Handhabungsobjektspektrums	177
Abbildung 8-39: Exemplarisches, visuelles Ergebnis der Nutzwertanalyse am Beispiel von drei Fingerkonfigurationen für das Handhabungsobjekt „Hohlteil_3“	179
Abbildung 8-40: Handhabungsversuch mit der in der Konfiguration ermittelten besten Konfiguration für das Handhabungsobjekt „Hohlteil_3“	180
Abbildung 8-41: Demonstratoraufbau bestehend aus Roboter, Greifer, T-Nutenplatte, Modulspeicher und Werkzeugkiste	181

Abbildung 9-1: Ausnutzungsgrad des Lösungsraumes für den EGI 80 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 67))	190
Abbildung 9-2: Ausnutzungsgrad des Lösungsraumes für den EGL 90 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Klüpfel, 2021, S. 67))	191
Abbildung 9-3: Rechenzeiten zur Ermittlung und Bewertung von jeweils fünf Greifpositionen pro Handhabungsobjekt	194
Abbildung 9-4: CAD-Modell eines Flaschendeckels (a) und zugehörige ermittelte Greifpositionen (b)	194
Abbildung 9-5: Exemplarische Konfigurationen, die für den EGI 80 für ausgewählte Objekte des Handhabungsobjektspektrums ermittelt wurden	195
Abbildung 9-6: Exemplarische Konfigurationen, die für den EGL 90 für ausgewählte Objekte des Handhabungsobjektspektrums ermittelt wurden	196
Abbildung 9-7: Gesamtnutzwerte des Baukastens mit dem Greifer EGI 80 zwei Variationen der Gewichtungsfaktoren (Datenpunkte durch interpolierende Linie angenähert)	197
Abbildung 9-8: Gesamtnutzwerte des Baukastens mit dem Greifer EGI 80 und einer weiteren Variation der Gewichtungsfaktoren (Datenpunkte durch interpolierende Linie angenähert)	198
Abbildung B-1: Mechanisches Schnittstellenkonzept 1 (MSK1)	LII
Abbildung B-2: Mechanisches Schnittstellenkonzept 2 (MSK2)	LIII
Abbildung B-3: Mechanisches Schnittstellenkonzept 3 (MSK3)	LIV
Abbildung B-4: Mechanisches Schnittstellenkonzept 4 (MSK4)	LV
Abbildung B-5: Mechanisches Schnittstellenkonzept 5 (MSK5)	LVI
Abbildung B-6: Mechanisches Schnittstellenkonzept 6 (MSK6)	LVII
Abbildung B-7: Mechanisches Schnittstellenkonzept 7 (MSK7)	LVIII
Abbildung B-8: Mechanisches Schnittstellenkonzept 8 (MSK8)	LIX
Abbildung C-1: vollständiger Merkmalsbaum	LXII
Abbildung E-1: Lösungskonzept 1 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 60))	LXV

Abbildung E-2: Lösungskonzept 2 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 61))	LXVI
Abbildung E-3: Lösungskonzept 3 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 61))	LXVII
Abbildung E-4: Lösungskonzept 4 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 61))	LXVII
Abbildung E-5: Lösungskonzept 5 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 62))	LXVIII
Abbildung E-6: Lösungskonzept 6 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 62))	LXVIII
Abbildung E-7: Lösungskonzept 7 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 63))	LXIX
Abbildung E-8: Lösungskonzept 8 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 67))	LXX
Abbildung E-9: Lösungskonzept 9 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 67))	LXXI
Abbildung E-10: Lösungskonzept 10 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 67))	LXXI
Abbildung E-11: Lösungskonzept 11 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 68))	LXXI
Abbildung E-12: Lösungskonzept 12 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 68))	LXXII
Abbildung E-13: Lösungskonzept 13 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 69))	LXXIII
Abbildung E-14: Lösungskonzept 14 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 69))	LXXIII
Abbildung E-15: Lösungskonzept 15 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 70))	LXXIV
Abbildung E-16: Lösungskonzept 16 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 70))	LXXV

Abbildung E-17: Lösungskonzept 17 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 64))	LXXVI
Abbildung E-18: Lösungskonzept 18 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 64))	LXXVII
Abbildung E-19: Lösungskonzept 19 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 65))	LXXVIII
Abbildung E-20: Lösungskonzept 20 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 72))	LXXIX
Abbildung E-21: Minimale Modullänge	LXXXI

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Klassifizierung von Handhabungsoperationen nach (Wolter, Volz & Woo, 1985)	69
Tabelle 6-1: Kombinatorischen Vielfalt für variable Modulanzahlen	90
Tabelle 7-1: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien	106
Tabelle 7-2: Anzahl durchzuführender Operationen bei einer Rekonfiguration	110
Tabelle 7-3: Basisbewegungen des Teilschritts „Öffnen der Kette“	111
Tabelle 7-4: Beispielhafte Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Öffnen der Kette“	111
Tabelle 8-1: Vergleich der betrachteten Greifermodelle	120
Tabelle 8-2: Beschreibung der Baukastenziele für den modularen Greiferfingerbaukasten	121
Tabelle 8-3: Anforderungen an Greiferfinger aus der Literatur	124
Tabelle 8-4: Übersicht zu den IGTA-Parametern	128
Tabelle 8-5: Anforderungen an die Schnittstellen (A_Schabel, 2021, S. 22)	131
Tabelle 8-6: Übersicht der mechanischen Schnittstellenkonzepte (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Schabel, 2021, S. 28))	134
Tabelle 8-7: Ergebnisse der durchgeführten FEM-Simulationen zur Fingeraufbiegung	138
Tabelle 8-8: Nutzwertanalyse mechanisches Schnittstellenkonzept	139
Tabelle 8-9: Übersicht der Pinbelegung für die Sensorkommunikation	140
Tabelle 8-10: Übersicht der Schnittstellenkomponenten	142
Tabelle 8-11: Nutzwertanalyse zur Ermittlung der Komponentenkosten (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 51))	152
Tabelle 8-12: Technische Daten der Feder D-185K	166
Tabelle 8-13: Übersicht zu den benötigten Leitungen der elektrischen Modulschnittstelle	167

Tabelle 8-14: Baukastenumfang bestehend aus 26 Modulen mit geometrischen Maßen und Angabe der enthaltenen Anzahl	170
Tabelle 8-15: Handhabungsobjektspektrum	172
Tabelle 8-16: Greifpunktesatz für das Objekt Pilzteil 5	173
Tabelle 8-17: Anzahl möglicher Kombinationen bei der Konfiguration der Greiferfinger	175
Tabelle 8-18: Bereitstellung der Baukastenmodule	175
Tabelle 8-19: Quantifizierung der Wertebereiche zur Ermittlung des Erfüllungsgrades (A_Klüpfel, 2021, S. 61)	178
Tabelle 8-20: Exemplarisches Bewertungsergebnis der Nutzwertanalyse am Beispiel der oben dargestellten drei Fingerkonfigurationen für das Handhabungsobjekt „Hohlteil_3“	179
Tabelle 8-21: Basisbewegungen des Teilschrittes „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 40)	181
Tabelle 8-22: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 41)	181
Tabelle 8-23: Validierungsergebnisse der MTM-Analyse (A_Frech, 2023, S. 43)	182
Tabelle 8-24: Maximaler Rekonfigurationsaufwand für die vier Teilschritte	183
Tabelle 8-25: Formatierung der Matrizen für die Rekonfigurationsaufwände zwischen Handhabungsobjekt 1 und Handhabungsobjekt 2	184
Tabelle 8-26: Ideale Greiferfingerkonfigurationen bei unabhängiger Betrachtung der Handhabungsobjekte	184
Tabelle 8-27: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge bei ausgeglichener Gewichtung und unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus	185
Tabelle 8-28: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektreihenfolge mit dem Fokus auf einer hohen Fingerqualität und unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus	185

Tabelle 8-29: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektfolgen mit dem Fokus auf einen geringeren Rekonfigurationsaufwand und unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus	186
Tabelle 8-30: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektfolgen bei ausgeglichener Gewichtung und unter Verwendung des Bellman-Ford-Algorithmus	186
Tabelle 8-31: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektfolgen mit dem Fokus auf einer hohen Fingerqualität und unter Verwendung des Bellman-Ford-Algorithmus	186
Tabelle 8-32: Fingerkonfigurationen für die Objekte der betrachteten Handhabungsobjektfolgen mit dem Fokus auf einen geringeren Rekonfigurationsaufwand und unter Verwendung des Bellman-Ford-Algorithmus	187
Tabelle 9-1: Umfang des modularen Greiferfingerbaukastens (A_Klüpfel, 2021, S. 25)	188
Tabelle 9-2: Einschränkungen der Konfigurationsmöglichkeiten durch objektunabhängige Kriterien für den Greifer EGI 80 (A_Klüpfel, 2021, S. 66)	189
Tabelle 9-3: Einschränkungen der Konfigurationsmöglichkeiten durch objektunabhängige Kriterien für den Greifer EGL 90 (A_Klüpfel, 2021, S. 66)	190
Tabelle 9-4: Ausnutzungsgrade der verschiedenen Baukästen	192
Tabelle 9-5: Übersicht zu Modulen und Modulanzahl des optimierten Baukastens (A_Klüpfel, 2021, S. 71)	192
Tabelle 9-6: Exemplarische Handhabungsobjektfolgen für die Untersuchung des Nutzwertverlauf bei sich ändernden Gewichtungsfaktoren	197
Tabelle A-1: Übersicht zu den Literaturquellen der aus der Literatur ermittelten Anforderungen	XLVII
Tabelle D-1: Erzeugbare Fingervarianten des Baukastens FiNGERKIT	LXIII
Tabelle E-1: Angaben zur Ermittlung der geometrischen Normzahlreihen	LXXXI
Tabelle E-2: Stufensprung ϕ für verschiedene Größenstufen	LXXXI
Tabelle E-3: Modulausprägungen bei verschiedenen Größenstufen	LXXXII

Tabelle E-4: Realisierbare Fingerkonfigurationen ohne Auskrägung bei drei Größenstufen des gera-den Moduls	LXXXII
Tabelle E-5: Zulässige Fingerkonfigurationen für $z = 3$ bei 4, 5 oder 6 identischen Größenstufen (i)	LXXXIII
Tabelle E-6: Zulässige Fingerkonfigurationen für $z = 3$ bei 2, 3 oder 4 identischen Größenstufen (i)	LXXXIII
Tabelle E-7: Anzahl an Fingerkonfigurationen für die betrachteten Größenstufen	LXXXIV
Tabelle E-8: Ausprägungen senkrechter Fingerlängen für $z = 3$ und $i = 2$ pro Finger	LXXXV
Tabelle F-1: Basisbewegungen des Teilschrittes „Öffnen der Kette“ (A_Frech, 2023, S. 39)	LXXXVI
Tabelle F-2: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Öffnen der Kette“ (A_Frech, 2023, S. 41)	LXXXVI
Tabelle F-3: Basisbewegungen des Teilschrittes „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 39)	LXXXVII
Tabelle F-4: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 41)	LXXXVII
Tabelle F-5: Basisbewegungen des Teilschrittes „Demontage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 40)	LXXXVII
Tabelle F-6: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Demontage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 42)	LXXXVIII
Tabelle F-7: Basisbewegungen des Teilschrittes „Schließen der Kette“ (A_Frech, 2023, S. 40)	LXXXVIII
Tabelle F-8: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Schließen der Kette“ (A_Frech, 2023, S. 42)	LXXXIX
Tabelle F-9: Zeitangaben der Einzelbewegungen in TMUs und die Summe der TMUs der vier Teilschritte (A_Frech, 2023, S. 43)	LXXXIX

Anhang

A Literaturquellen zu den ermittelten Anforderungen an den Greiferfingerbaukasten

Tabelle A-1: Übersicht zu den Literaturquellen der aus der Literatur ermittelten Anforderungen

#	Originaltext	Anforderung	Quelle
1	Minimize finger length	Die Greiferfinger sollten gerade und kurz sein	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 263)
2	Chamfer the exterior of gripper fingers	Die Außenseite der Greiferfinger sollte die Möglichkeit bieten, benachbarte Werkstücke des betrachteten Werkstückes zu verschieben	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 254)
3	Design chamfers on approach surfaces	Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte fähig sein, leicht aus der Position geratene Werkstücke richtig zu orientieren	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 265)
4	Minimize weight The weight of a gripper can be used to check against the lifting capacity of the robot employed as mentioned previously; for successful matching, the former must clearly be less than the latter. If more than one gripper is acceptable for a handling task, then the lightest gripper is preferred to the others.	Das Gewicht der Greiferfinger sollte gering sein	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 255) (Pham & Yeo, 1988, S. 311)
5	Ensure a secure grasp of part	Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte die Möglichkeit bieten, einen möglichst großen Flächenkontakt zwischen Greiferfinger und Werkstück herzustellen	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 256)
6	Grasp multiple parts with a single gripper Ideally though, the fingers should be capable of manipulating multiple objects, thus reducing the need for multiple grippers. In addition, this would decrease the number of tool change operations needed for a given assembly operation, thereby reducing cycle times.	Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, mehrere Werkstücke zu greifen	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 258) (Velasco & Newman, 1996, S. 6)
7	Include Functionality in Gripper Fingers	Die Greiferfinger sollten die Fähigkeit bieten, weitere Funktionen (neben dem Halten) zu übernehmen	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 261)
8	Minimize the gripper footprint	Die Greiferfinger sollten möglichst klein sein	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 254)
9	Design grippers to align parts as they are grasped	Die Greiferfinger sollten nicht exakt positionierte Werkstücke sicher greifen	(Causey & Quinn, 1998, S. 1455) (Causey, 1999, S. 265)
10	Design gripping surface to complement frictional coefficient Design for proper gripper-part interaction	Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte die Reibung zwischen Werkstück und Greiferfinger maximieren	(Causey, 1999, S. 265) (Causey & Quinn, 1998, S. 1455)
11	Design fingers to encompass mounting points	Die Greiferfinger müssen mit der Grundbacke des Greifers formschlüssig verbunden sein	(Causey & Quinn, 1998, S. 1456) (Causey, 1999, S. 265)

- | | | | |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 12 | Do not rely on parts added to the assembly for location
Do not rely on added parts, for location | Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, Werkstücke an konstanten Merkmalen zu greifen | (Causey, 1999, S. 269)

(Causey & Quinn, 1998, S. 1456) |
| 13 | Using off the shelf components for the gripper design whenever possible is helpful in reducing cost | Die Greiferfinger sollten aus leicht verfügbaren, handelsüblichen Komponenten bestehen | (Causey & Quinn, 1998, S. 1453)
(Causey, 1999, S. 273) |
| 14 | To realize the force closure by using the parallel gripper, the gripper has to make a line contact or a surface contact with the object at least at one of the contact points.
When objects to be grasped are of different shape and size the friction method is normally used whereby the part is restricted from moving by the friction present between the fingers and the object. In this way the fingers exert sufficient force to hold the part against gravity, acceleration and any other force that might arise during the holding portion of the work cycle | Die Wirkflächen der Greiferfinger sollten fähig sein, einen Kraftschluss zwischen Werkstück und Greiferfinger zu ermöglichen | (Harada et al., 2011, S. 1540)

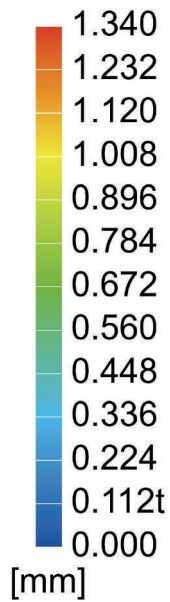
(Seguna & Saliba, 2001, 1195-1196) |
| 15 | The first and obvious rule is that the surface which the industrial robot's hand is to grasp must be reachable. | Die Greiferfinger müssen die Distanz zwischen Greifer und Werkstück überbrücken | (Engelberger, 1983, S. 42) |
| 16 | The finger design has to accommodate the shape of the object to be grasped taking into account the task constraints and the unavoidable process uncertainties, such as pose estimation errors due to shortcomings of the vision system, or variations in the objects properties. | Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Werkstücke auch bei Größenschwankungen sicher zu greifen | (Wolniakowski et al., 2018, S. 78) |
| 17 | The hand and fingers must be able to accommodate the change in dimension of a part that may occur between the part loading and the part unloading operations. | Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, sich verändernde Werkstücke (Bearbeitung, Montage) sicher zu greifen | (Engelberger, 1983, S. 42) |
| 18 | Consider how delicate surfaces are to be grasped and whether they may be distorted or scratched. | Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Werkstücke auch an empfindlichen Oberflächen sicher zu greifen | (Engelberger, 1983, S. 42) |
| 19 | Select the larger if there is a choice of grasping a part on either of two different dimensions. Normally, this will assure better control in positioning the part. | Die Greiferfinger sollten den Kontakt zum Werkstück an der größten Greiffläche herstellen | (Engelberger, 1983, S. 42) |
| 20 | In order to grip surfaces which are not exactly parallel, the fingers or pads of the gripper should be able to adapt accordingly by means of some adjusting mechanism, such as that shown in Fig. 2. | Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte sich an die Geometrie der Werkstücke anpassen | (Pham & Yeo, 1988, S. 303) |
| 21 | It should also be remembered that only a fraction of the grasping force, proportional to the friction coefficient, might be available to secure the workpiece and counteract gravity depending on the design of the fingers. | Die Greiferfinger müssen die Greifkraft des Greifers auf das Werkstück übertragen | (Birglen & Schlicht, 2018, S. 91) |
| 22 | To realize the force closure by using the parallel gripper, the gripper has to make a line contact or a surface contact with the object at least at one of the contact points. | Die Greiferfinger müssen mindestens auf einer Seite des Werkstücks einen Linien- oder Flächenkontakt herstellen | (Harada et al., 2011, S. 1540) |

- 23 It means that, when planning the grasping posture of a parallel gripper, we have to find two parallel planes on the object surface that can contact the finger surfaces. However, especially when the object has complex shape, it becomes difficult to find two parallel planes on the object surface. Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, das Werkstück an zwei parallelen Stellen zu greifen (Harada et al., 2011, S. 1540)
- 24 As shown in Fig. 1, there are three ways of gripping a component depending on the types of contact between the fingers and the surfaces: namely plane-plane, plane-line and line-line contact. The plane-plane type is preferred to the plane-line and line-line types while plane-line contact is preferred to line-line contact. This is because a plane is better than a line at constraining an object and can apply a more evenly distributed pressure during gripping Die Wirkfläche der Greiferfinger sollte einen Ebenen-Ebenen-Kontakt zwischen Werkstück und Greiferfinger ermöglichen (Pham & Yeo, 1988, S. 302)
- 25 Consider the tolerance of the surface we grasp and its influence on the accuracy in placing a part. If the machined portion of a cast part is to be inserted into a chuck - and the robot must grasp the cast surface - the opening in the chuck must be larger than the eccentricity between the cast and the machined surfaces. Die Greiferfinger sollten den notwendigen Hub des Greifers minimieren (Engelberger, 1983, S. 42)
- 26 The perpendicular distance between a pair of parallel surfaces will determine the minimum opening of the fingers of the gripper. For surfaces that are slightly off parallel, the distance between the centroids of the common area on the two surfaces is used (see Fig. 3). Die Greiferfinger müssen mindestens eine Griffweite vom horizontalen Abstand der beiden Greifpunkte realisieren (Pham & Yeo, 1988, S. 303)
- 27 In general, it is desirable to grip a component so that its centre of mass is as close as possible to both the gripping axis and the axis of the gripper so that the overall torques acting on the gripper are minimised. Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, Werkstücke möglichst nahe am Schwerpunkt zu greifen (Pham & Yeo, 1988, S. 306)
- 28 As a guideline, external gripping is preferred to internal gripping because the latter normally imposes more constraints on the movement that the gripper needs to go through to effect the gripping task. Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, Werkstücke von außen zu greifen (Pham & Yeo, 1988, S. 307)
- 29 Intelligent interaction with the physical world requires perceptual abilities beyond vision and hearing; vibrant tactile sensing is essential for autonomous robots to dexterously manipulate unfamiliar objects or safely contact humans. Die Fingerspitze sollte die Möglichkeit bieten, Sensoren zu integrieren (Andrussow et al., 2023, S. 1)
- Modular or detachable fingers equipped with sensors are an alternative for engineers to design multi-use flexibility in their devices. (Chen, Zhao & Chow, 2015, S. 2035)

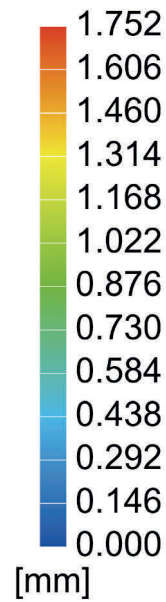
- 30 Typical robots, whether collaborative or not, mostly rely on standard translational grippers for pick-and-place operations. These grippers are constituted from an actuated motion platform on which a set of jaws is rigidly attached. These jaws are often designed to secure a precise and limited range of objects through the application of pinching forces. The finger and the gripper body must be designed for secure attachment to ensure that forces are correctly transferred, and the gripper can handle loads without failure. Die Greiferfinger müssen mit dem Greifer sicher verbunden sein (Birglen, 2019, S. 523)
- 31 The quality measures are chosen to meet the following performance requirements on a grasp: (i) force-closure quality measure to ensure equal distribution of contact forces; (ii) center of mass (COM) quality measure to ensure better resistance of gravity wrench; (iii) grasp robustness measure to ensure robustness against positioning error of the gripper; (iv) volume of wrench space measure to ensure that the grasp can resist larger external forces and torques. Die Greiferfinger müssen fähig sein, Werkstücke bei auftretenden Kräften und Momenten sicher zu greifen (Hota et al., 2024, S. 2)
- 32 The configuration is completed with a four-pin connector installed on the back of the bottom cover. The connection board is capable of controlling communication in all the motors and fingertip sensors at the same time and provides a compact and highly complete wiring configuration for the robotic hand. ... the communication and power sources are completed with a four-pin connector.... Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Sensoren in der Fingerspitze elektrisch zu versorgen (Kim et al., 2021, S. 11)
- However, traditional sensors mostly require an external power supply to meet real-time monitoring, which brings many drawbacks. (Liu et al., 2024, S. 1)
- 33 However, traditional sensors mostly require an external power supply to meet real-time monitoring, which brings many drawbacks. Die Greiferfinger müssen die Möglichkeit bieten, Signale zu übertragen (Liu et al., 2024, S. 1)
- 34 „rigid hands provide a more precise grasp.“ Die Greiferfinger müssen ausreichend steif in alle Richtungen sein (Capsi-Morales et al., 2021, S. 1)
- 35 The automatic finger production in combination with the quick exchange system has the potential to significantly decrease the offline time required to adapt assembly lines to a new product. Die Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, schnell demontiert zu werden (Ringwald et al., 2023, S. 1867)
- Fingers of the device should be easily exchanged or replaced without replacing the entire rotary mechanism. (Causey, 1999, S. 303)
- 36 The increased exchangeability can lead to a simple replacement of defective modules according to the 'plug & play' principle, whereby a disassembly of the entire product or system could be avoided. Die Schnittstellenkomponenten sollten austauschbar sein (Brylowski et al., 2020, S. 47)

- 37 „... the three-finger gripper ... users ... noted that transitioning to more robust materials such as aluminium or PETG could substantially improve the durability and longevity of the gripper ...
- Die Lebensdauer der Greiferfinger sollte der des Greifers entsprechen (Rahman et al., 2024, S. 16)
- The very earliest durability testing we conducted indicated that the service life of our prototypes was on the order of 1000 grips. ... With a significant materials development effort, we hypothesized that a two-order-of-magnitude increase in service life could be possible. However, even at 100,000 grips, a ... replacement ... within 70 work days. (Amend et al., 2016, S. 215)
- „However, soft hands suffer from poor grasping robustness and operation durability, especially for heavy objects or objects with sharp spikes, mainly due to their fragile material and low structural stiffness of the soft actuators. (Zhou et al., 2020, S. 743)
- 38 Compliant gripping surfaces have more kinematic coupling at each contact with an object so that fewer contacts are required to completely restrain an object Die Wirkflächen der Greiferfinger sollten die Möglichkeit bieten, wiederverwendet zu werden (Cutkosky & Wright, 1986, S. 33)
- 39 The design of linkage actuation helps in finding out the conversion of gripper's input force into the gripping force, the time taken to actuate the gripper, and the maximum capability to open the finger Die Schnittstelle zwischen Greifer und Greiferfinger muss fähig sein, die Greifkraft des Greifers auf den Finger zu übertragen (Latake & Phalle, 2014, S. 47)
- Design Fingers to Encompass Mounting Points (Causey, 1999, S. 268)
- 40 In general, it is desirable to grip a component so that its centre of mass is as close as possible to both the gripping axis and the axis of the gripper so that the overall torques acting on the gripper are minimised. Die Greiferfinger müssen einen Versatz der Greifergrundbacken ausgleichen (Pham & Yeo, 1988, S. 306)
- 41 However, whenever possible, designing fingers to handle multiple parts should be examined before utilizing a rotary wrist. Die Greiferfinger sollten auf verschiedene Greifermodellen montierbar sein (Causey, 1999, S. 274)
- Fingers of the device should be easily exchanged or replaced without replacing the entire rotary mechanism. (Causey, 1999, S. 303)
- A gripper designer should generate optimum systems so as to minimize, or ideally avoid, gripper changes during assembly. In the past, techniques such as changing the fingers and grooving the jaws (those parts of the gripper in contact with the component) of the gripper were often used. (Pham, Gourashi & Eldukhri, 2007, S. 1647)
- 42 „Co-locating sensing and embedded computation with the actuators greatly simplifies control and system integration.“ Die Sensorsignale sollten fingernah ausgewertet werden (Farrow, Li & Correll, 2016, S. 1)

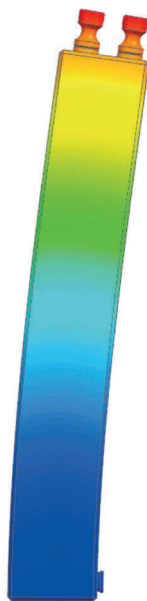
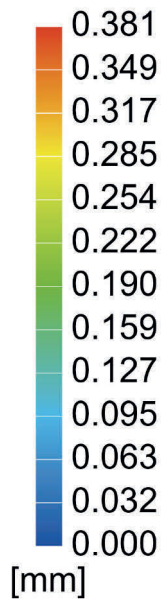
B FEM-Ergebnisse



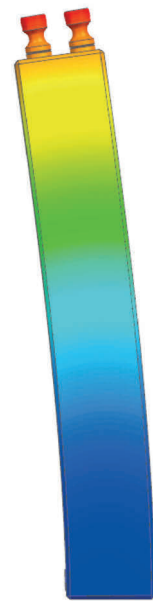
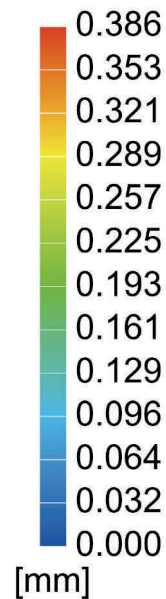
a) Aufbiegung in Greifrichtung



b) Aufbiegung gegen die Greifrichtung

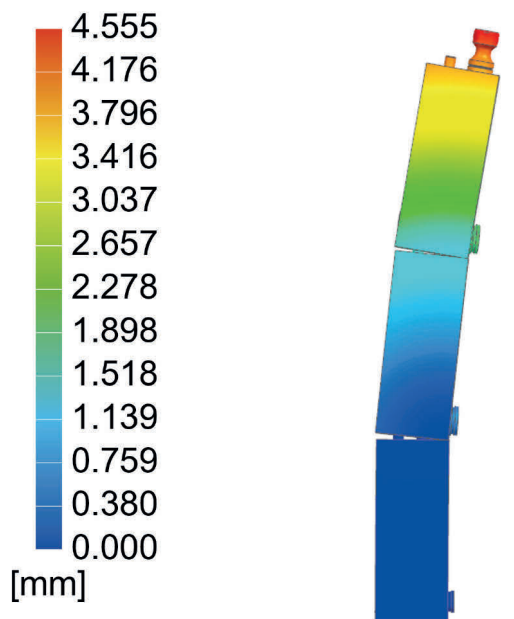


c) Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung

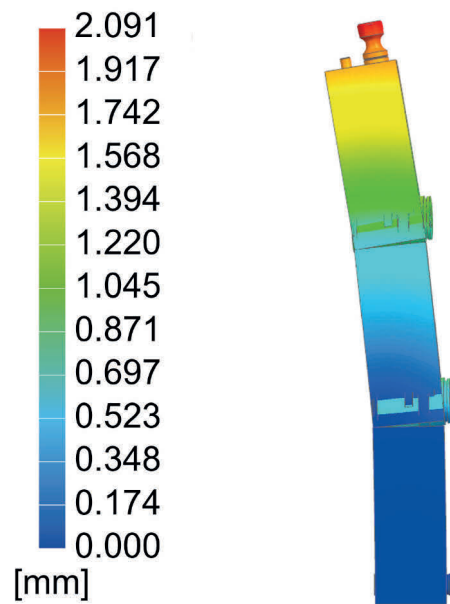


d) Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung

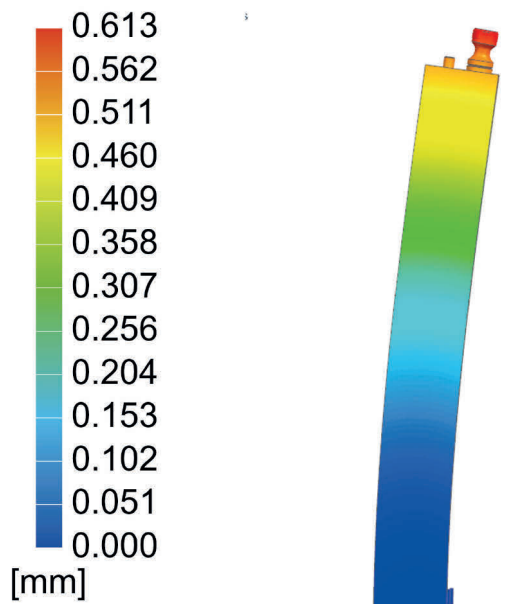
Abbildung B-1: Mechanisches Schnittstellenkonzept 1 (MSK1)



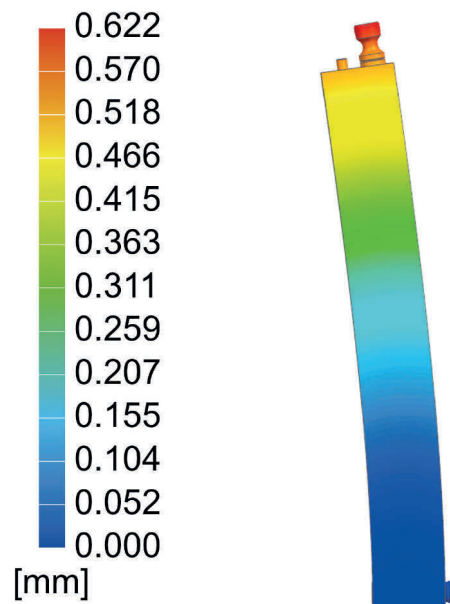
a) Aufbiegung in Greifrichtung



b) Aufbiegung gegen die Greifrichtung

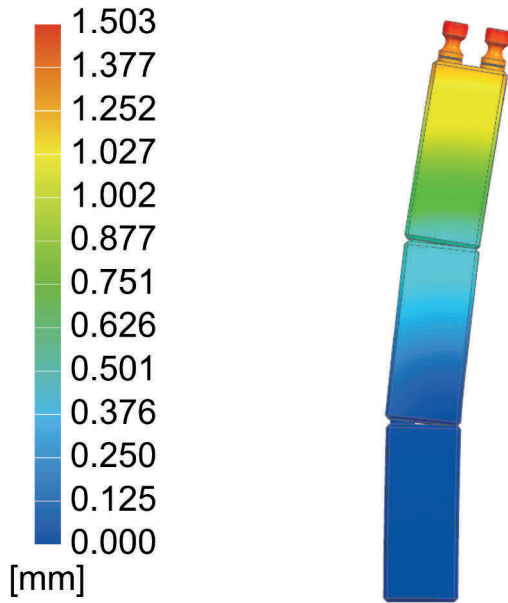


c) Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung

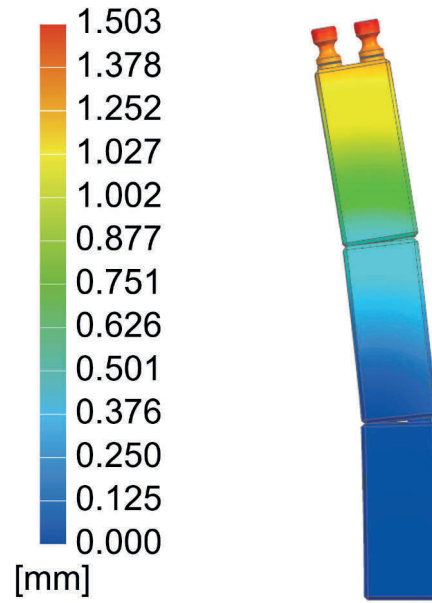


d) Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung

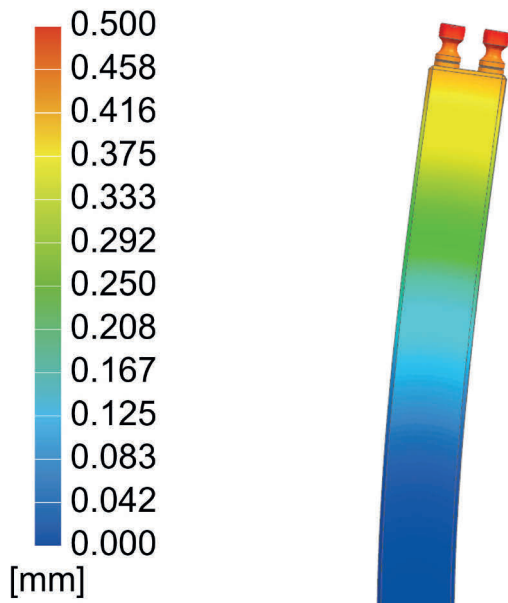
Abbildung B-2: Mechanisches Schnittstellenkonzept 2 (MSK2)



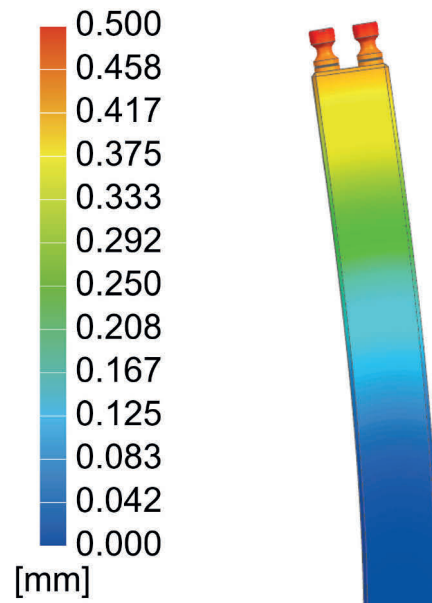
a) *Aufbiegung in Greifrichtung*



b) *Aufbiegung gegen die Greifrichtung*

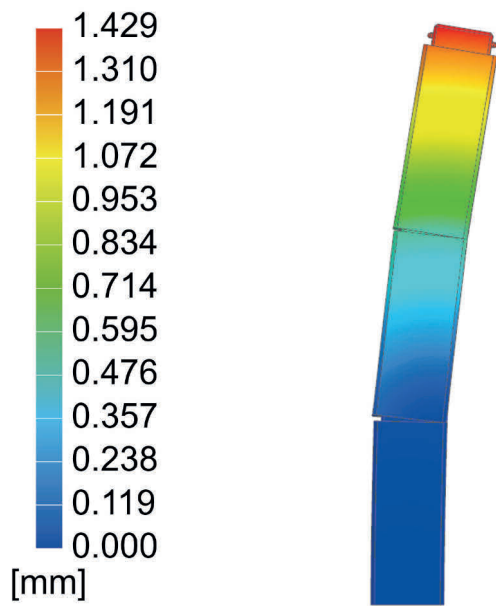
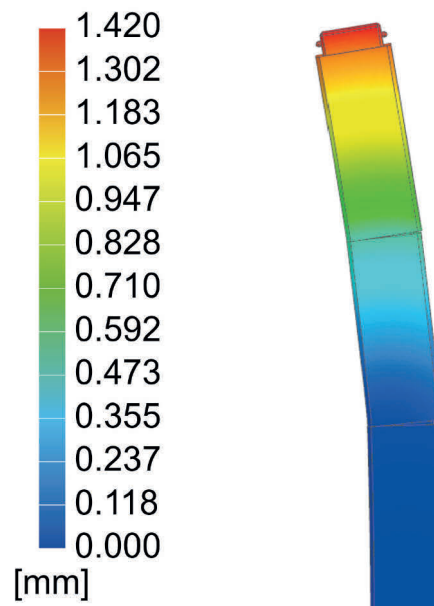
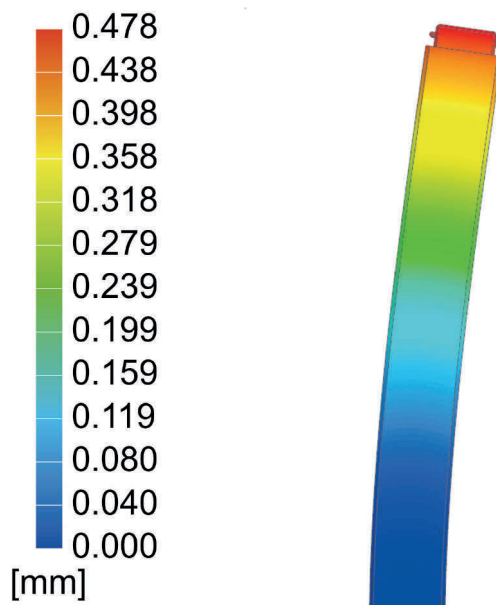
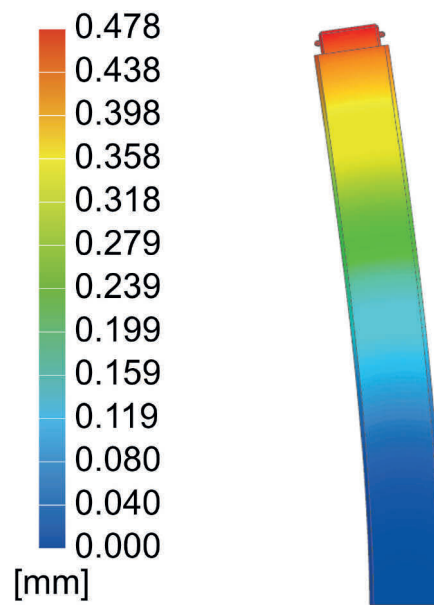


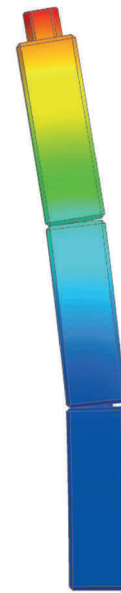
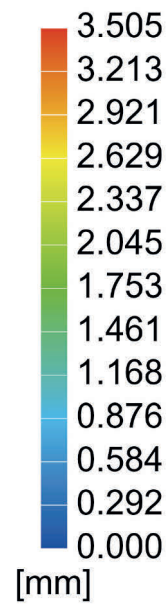
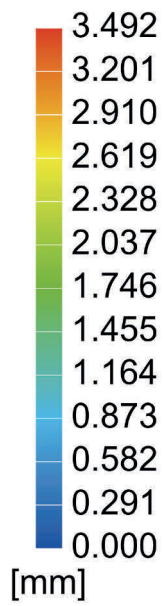
c) *Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung*



d) *Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung*

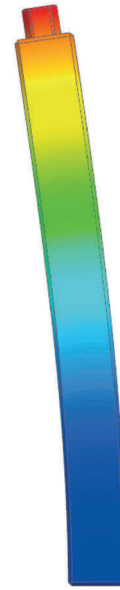
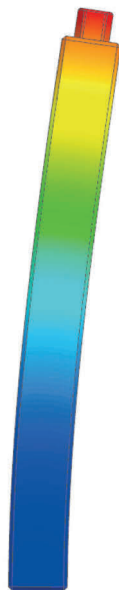
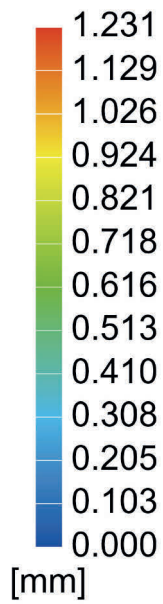
Abbildung B-3: Mechanisches Schnittstellenkonzept 3 (MSK3)

a) *Aufbiegung in Greifrichtung*b) *Aufbiegung gegen die Greifrichtung*c) *Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung*d) *Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung*Abbildung B-4: *Mechanisches Schnittstellenkonzept 4 (MSK4)*



a) *Aufbiegung in Greifrichtung*

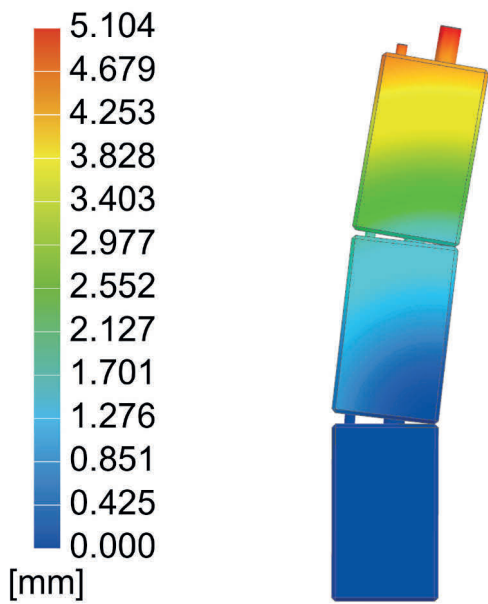
b) *Aufbiegung gegen die Greifrichtung*



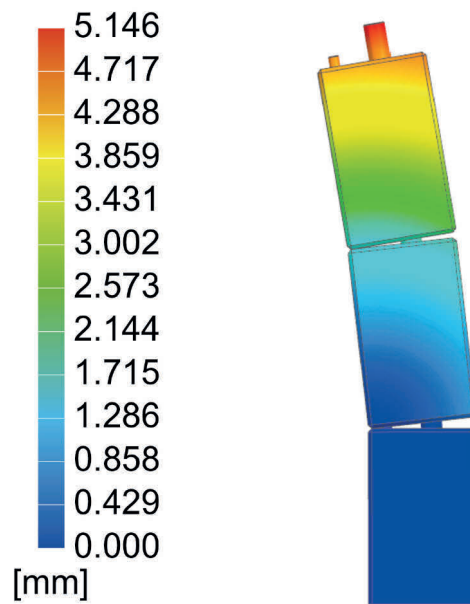
c) *Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung*

d) *Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung*

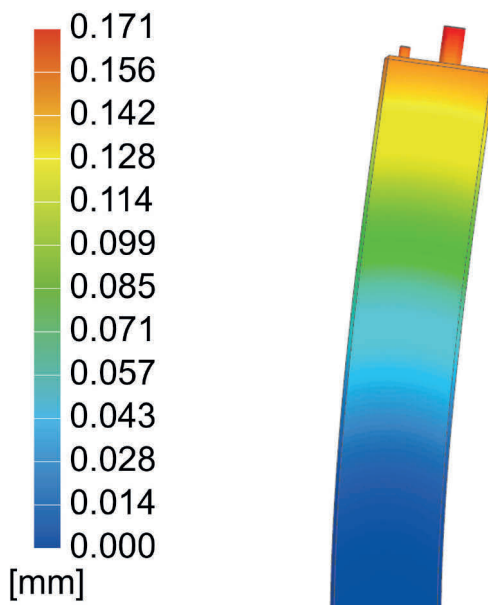
Abbildung B-5: Mechanisches Schnittstellenkonzept 5 (MSK5)



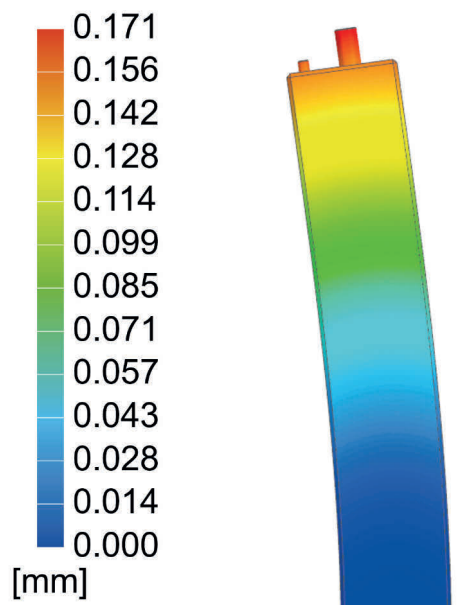
a) *Aufbiegung in Greifrichtung*



b) *Aufbiegung gegen die Greifrichtung*

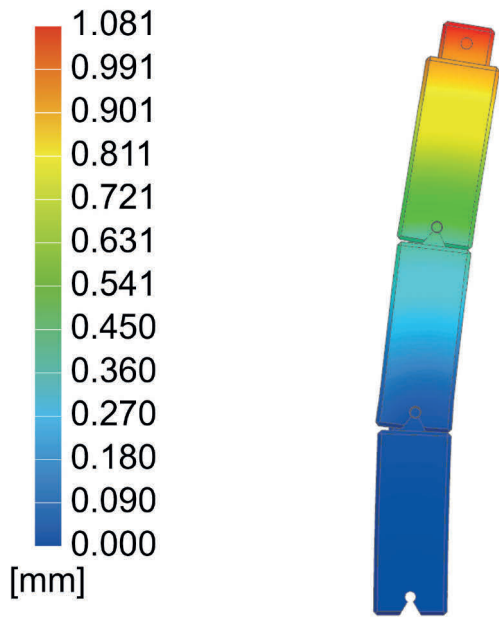


c) *Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung*

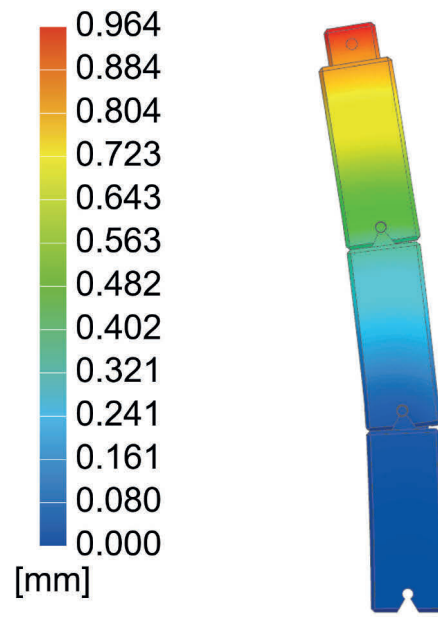


d) *Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung*

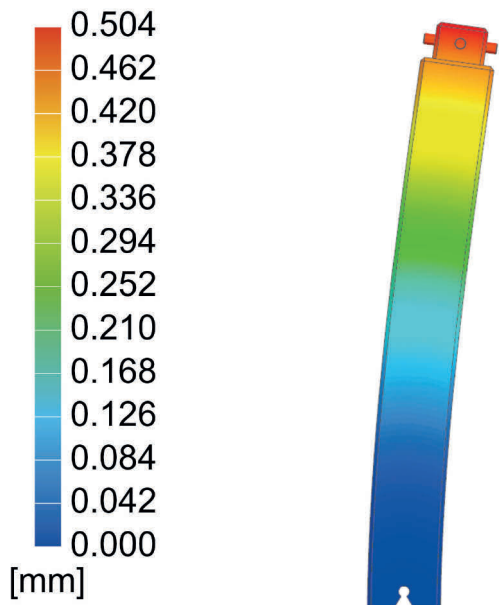
Abbildung B-6: Mechanisches Schnittstellenkonzept 6 (MSK6)



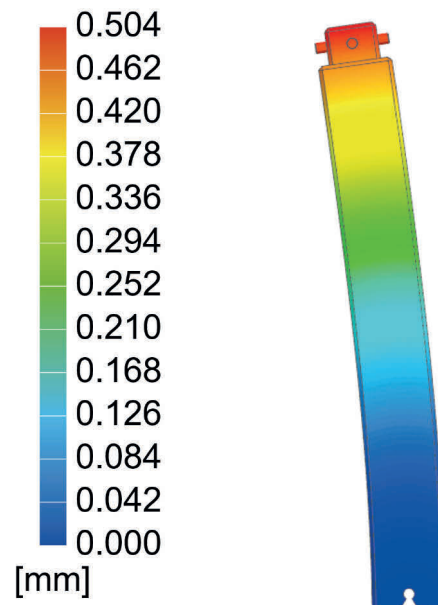
a) *Aufbiegung in Greifrichtung*



b) *Aufbiegung gegen die Greifrichtung*

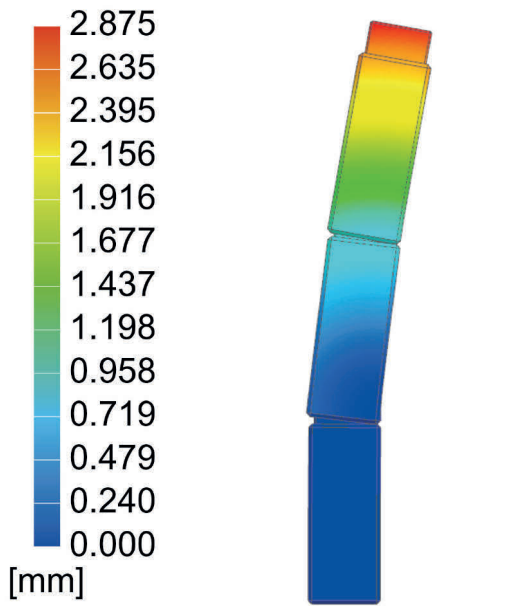


c) *Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung*

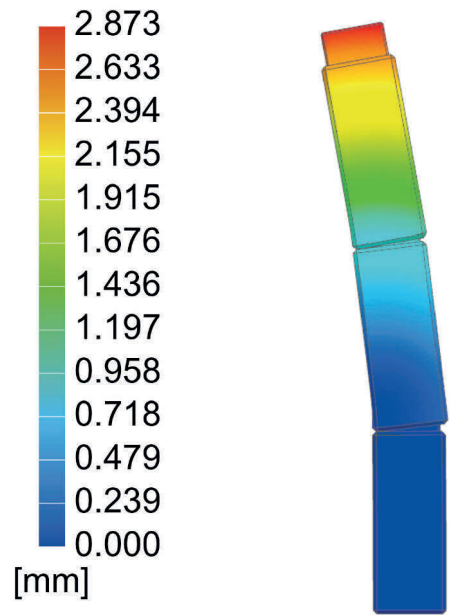


d) *Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung*

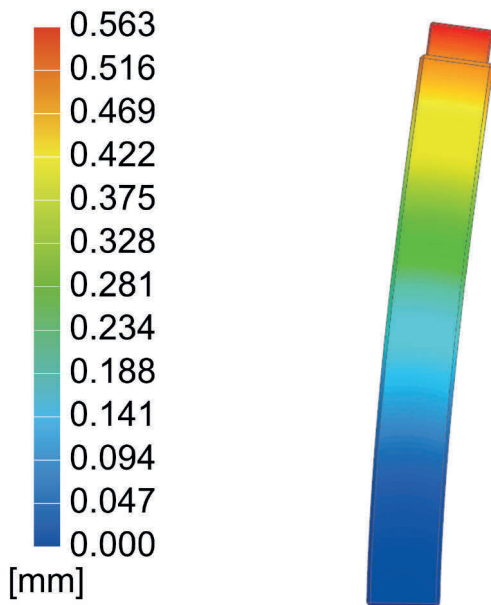
Abbildung B-7: Mechanisches Schnittstellenkonzept 7 (MSK7)



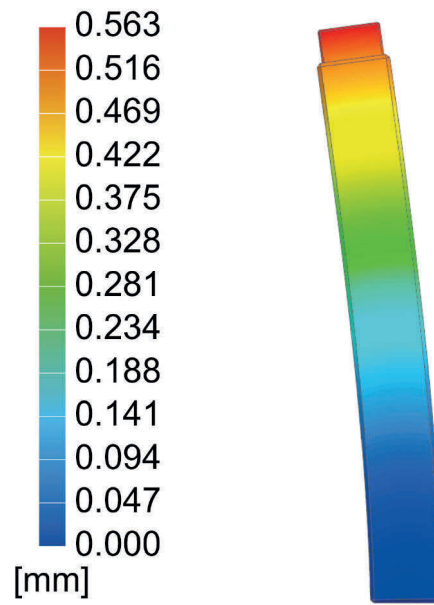
a) *Aufbiegung in Greifrichtung*



b) *Aufbiegung gegen die Greifrichtung*



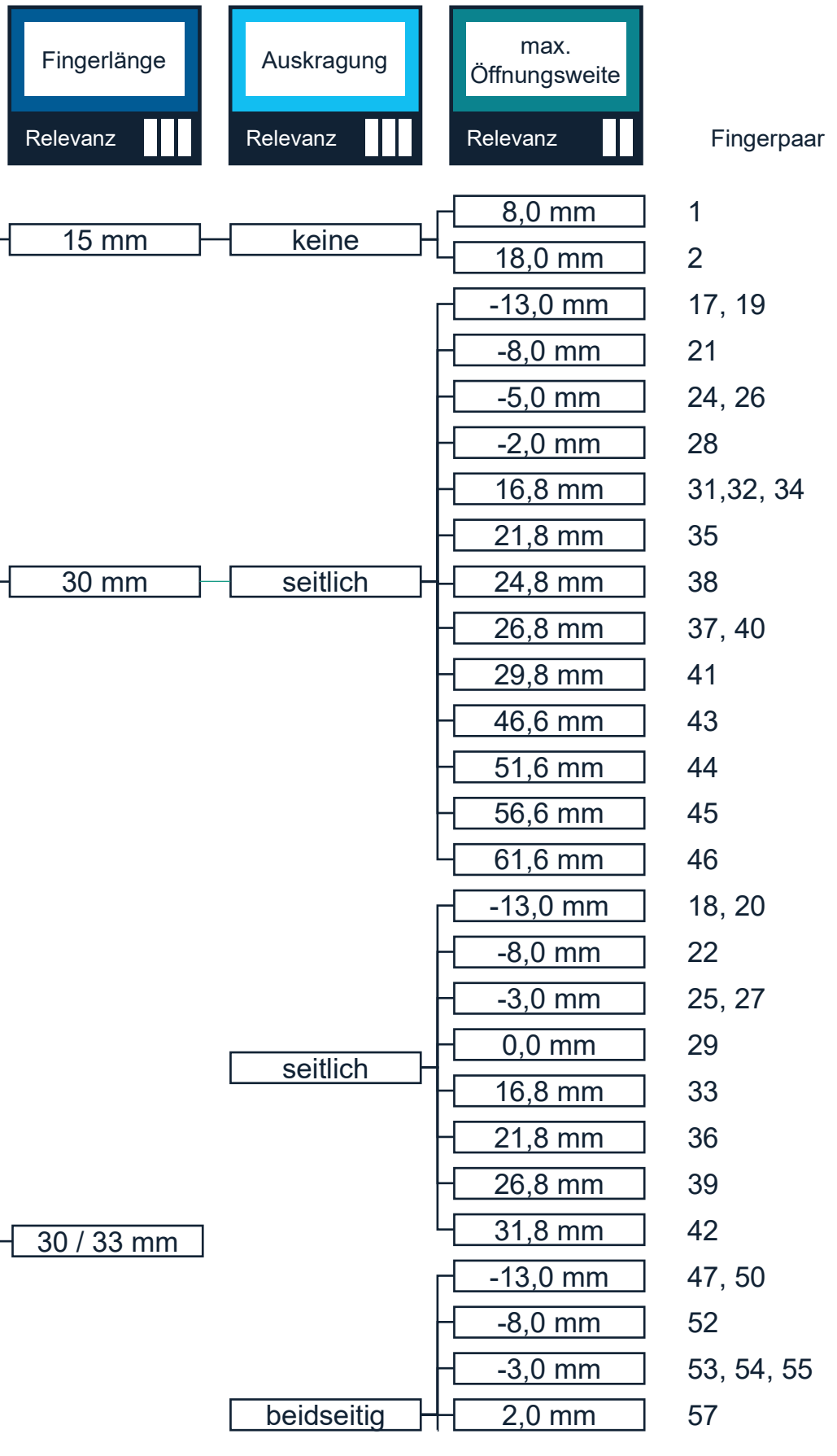
c) *Aufbiegung des Referenzfingers in Greifrichtung*

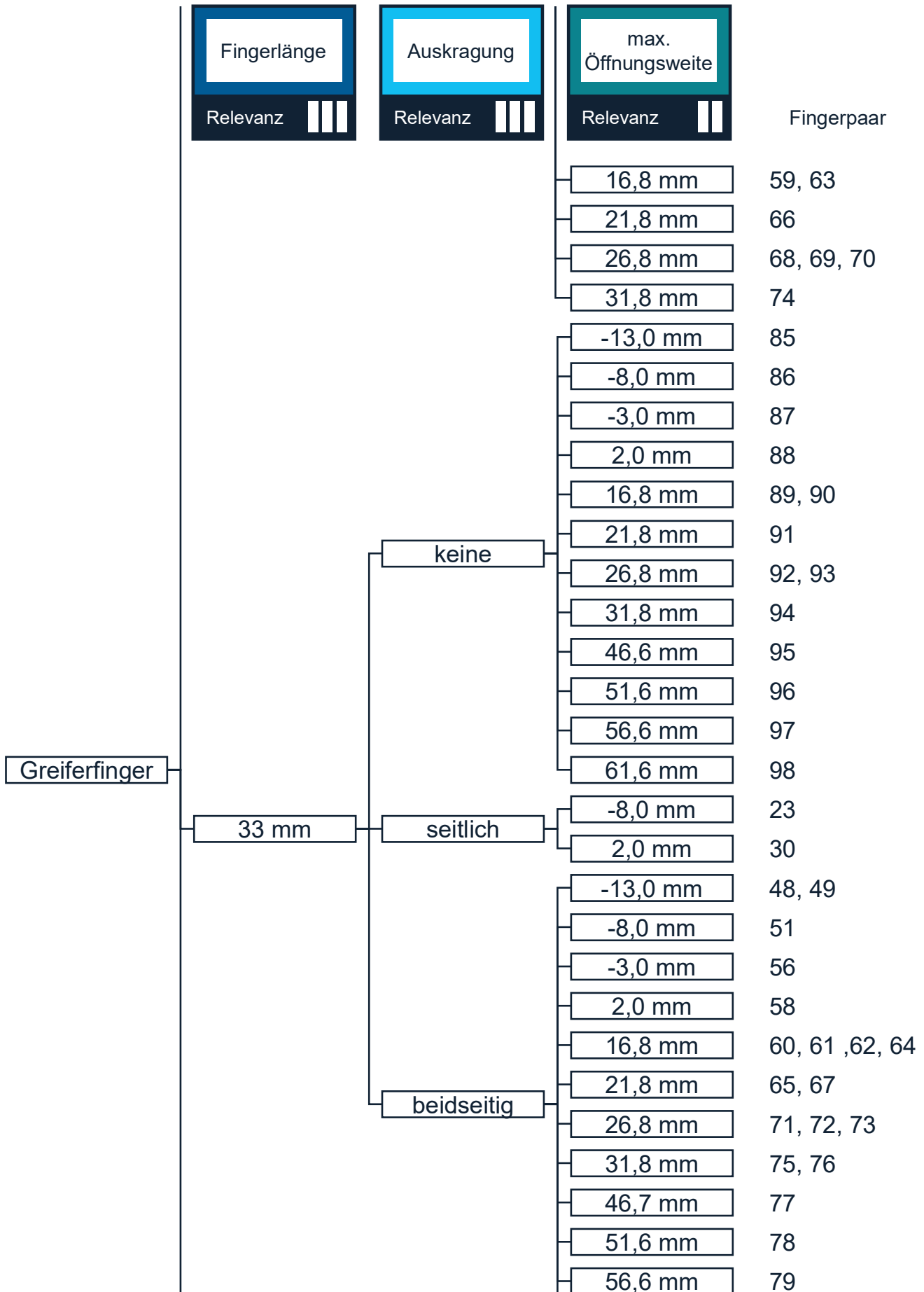


d) *Aufbiegung des Referenzfingers gegen die Greifrichtung*

Abbildung B-8: Mechanisches Schnittstellenkonzept 8 (MSK8)

C Merkmalbaum des Weiss Robotics FINGERKIT





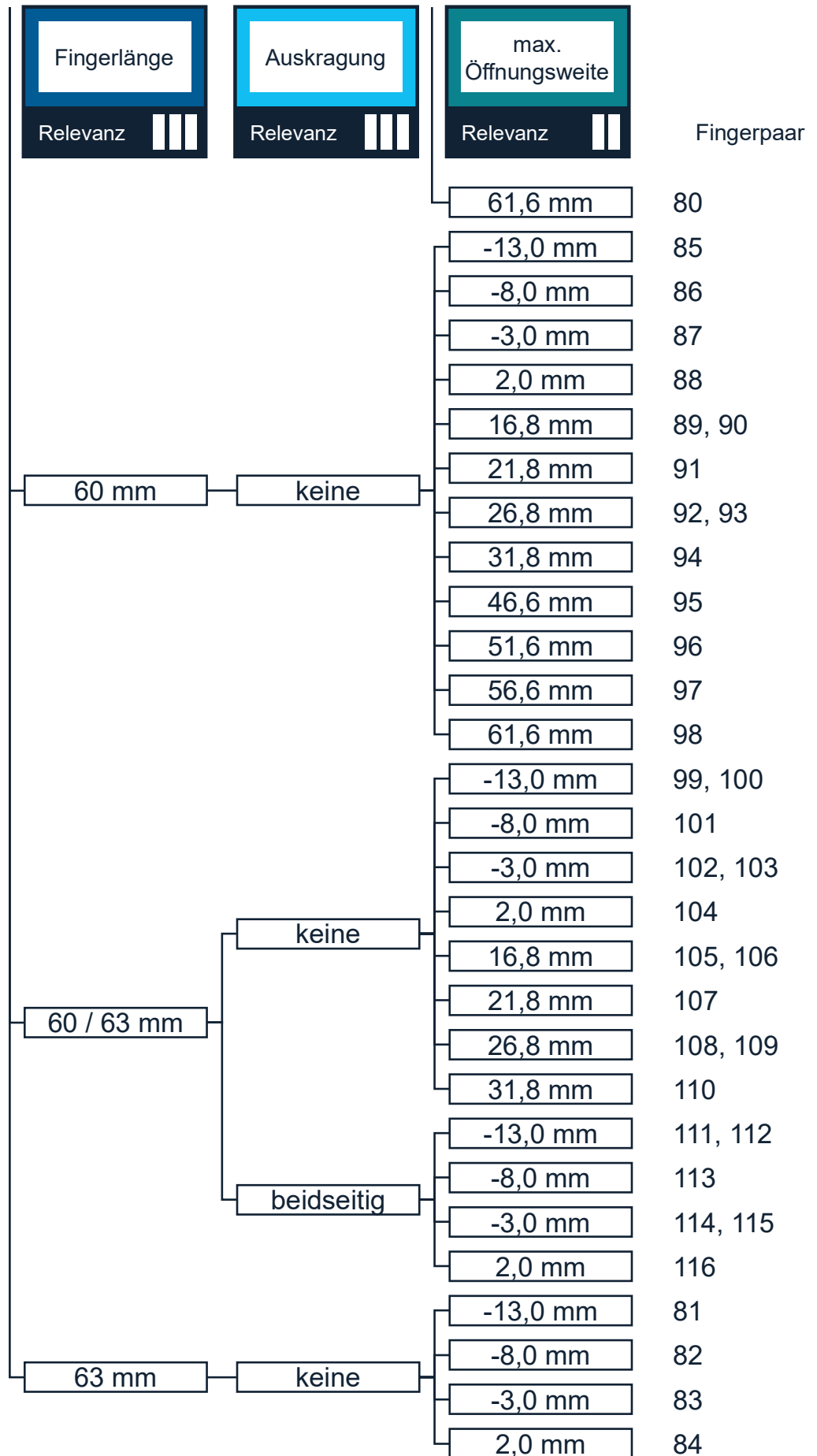



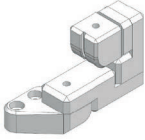
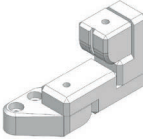
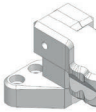
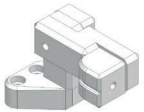
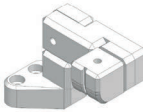
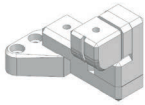
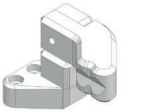
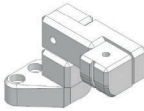
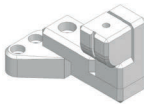
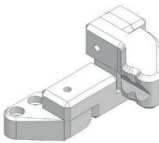
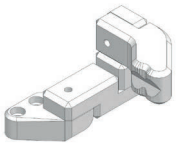
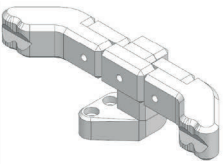
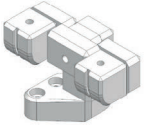
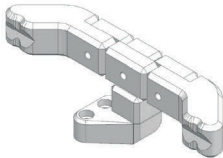
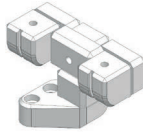
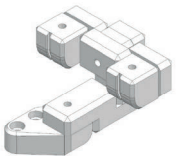
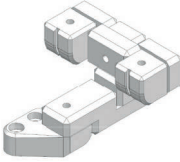
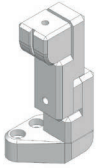
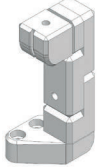
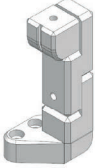
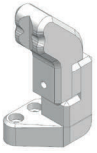

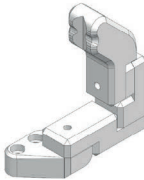
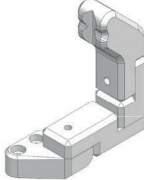
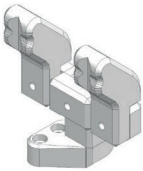
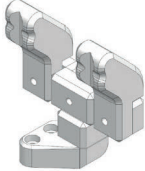



Abbildung C-1: vollständiger Merkmalsbaum

D Erzeugbare Fingervarianten aus dem Greiferfingerbaukastens FINGERKIT

Tabelle D-1: Erzeugbare Fingervarianten des Baukastens FINGERKIT

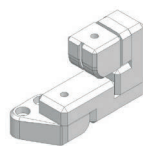
				
1	2	3	4	5
				
6	7	8	9	10
				
11	12	13	14	15
				
16	17	18	19	20
				
21	22	23	24	25
				
26	27	28	29	30



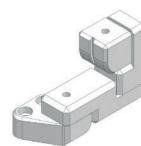
31



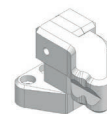
32



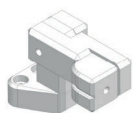
33



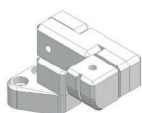
34



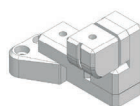
35



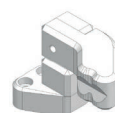
36



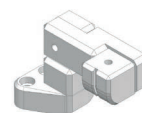
37



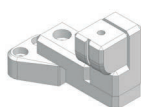
38



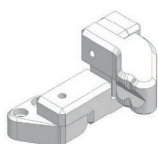
39



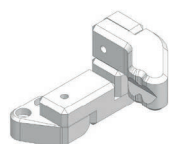
40



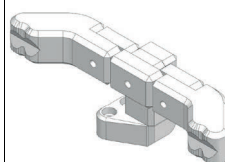
41



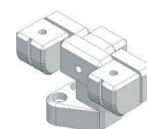
42



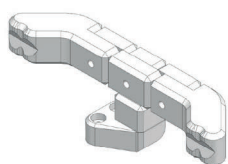
43



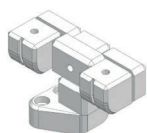
44



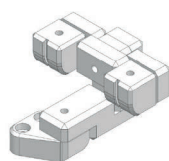
45



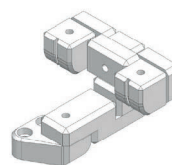
46



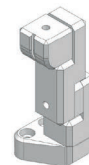
47



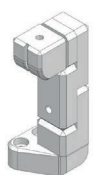
48



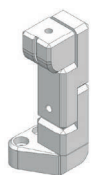
49



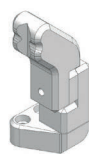
50



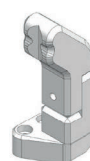
51



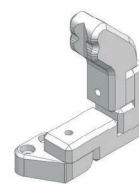
52



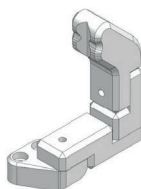
53



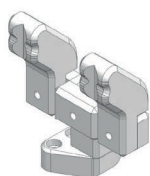
54



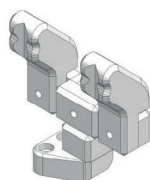
55



56



57



58

E Lösungskonzepte zur Erreichung einer höheren Variantengerechtigkeit

Lösungskonzepte auf der Ebene der Komponenten

Lösungskonzept 1 sieht für jedes Greifermodell, für den der Baukasten verwendet werden soll, ein individuelles Modul vom Typ A vor. Dadurch entstehen n-Varianten mit $n=2$ für die initiale Entwicklung des Baukastens mit den beiden Greifermodellen SCHUNK EGL 90 und SCHUNK EGI 80. Das VAM ändert sich dadurch nicht. Die Anschlussbilder aller Greifermodelle lassen sich in eine Fingerbasisplatte integrieren. Die Verwendung von nur einer Variante vom Modultyp A wird mit **Lösungskonzept 2** verfolgt. In einem Modul werden die Schnittstellen von einer festen Zahl betrachteter Greifermodule integriert für die der Baukasten geeignet ist (A_Meschter, 2021, S. 59–60).

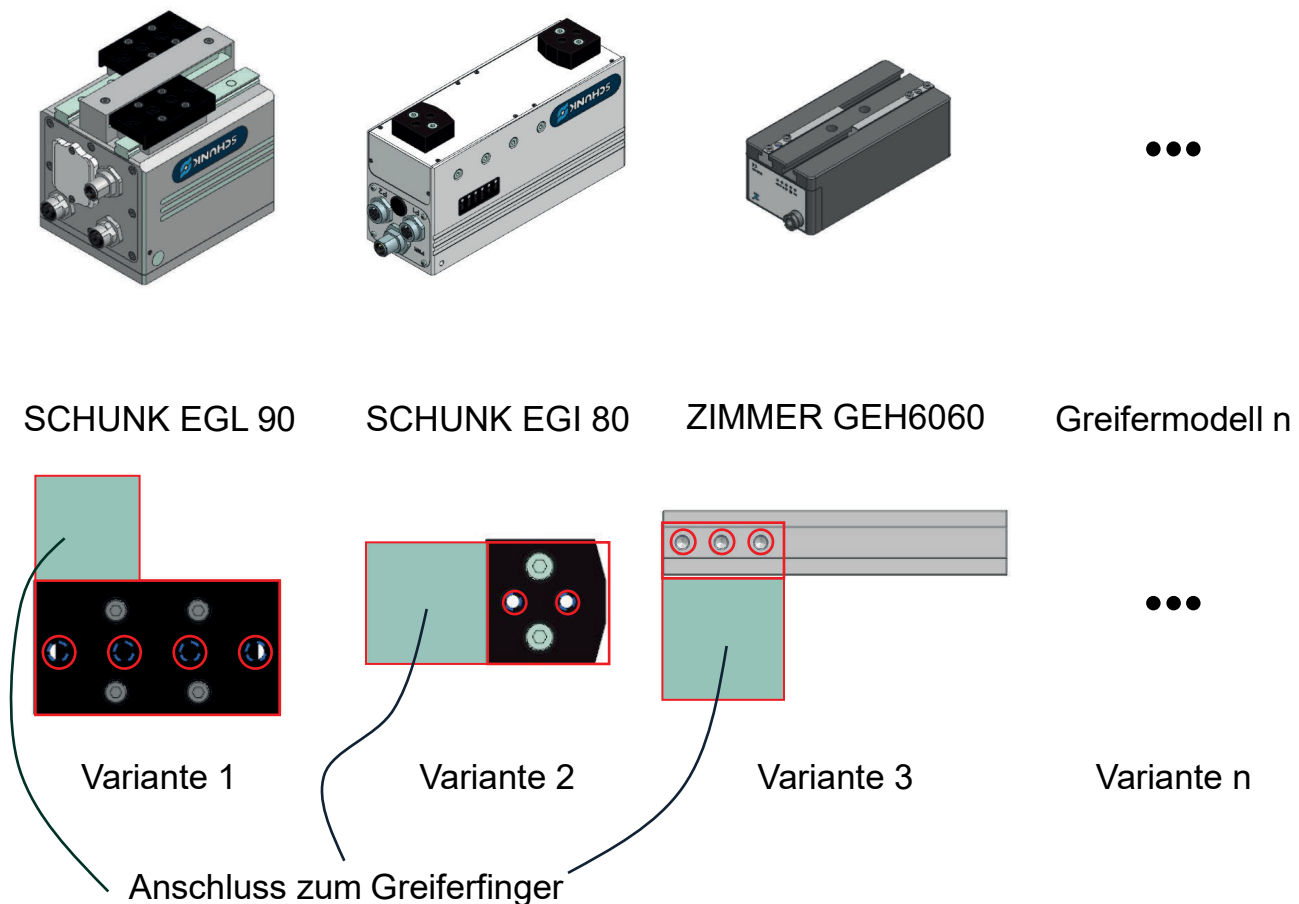
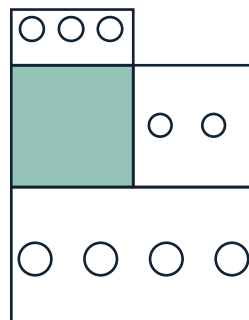


Abbildung E-1: Lösungskonzept 1 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 60))

Das Basismodul wird damit zur Standardkomponenten für das Unterscheidungsmerkmal *Greifermodell*, die Komponentenkarte verschwindet und das VAM entspricht an dieser Stelle dem Idealzustand.

Negativ wirkt sich jedoch die vergrößerte Störkontur und die Auswirkungen auf die Öffnungsweite aus (A_Meschter, 2021, S. 58–61). Zusätzlich wäre es möglich die Lösungskonzepte 1 und 2 so zu realisieren, dass die Schnittstellen zum Greifermodul und zu den Fingermodulen übereinander gestapelt werden. Dies wirkt sich positiv auf die Störkontur aus, aber erhöht die vertikale Modulgröße, beeinflusst die Flexibilität in der Fingerlänge und gestaltet die Zugänglichkeit zur Befestigung des Moduls komplexer.



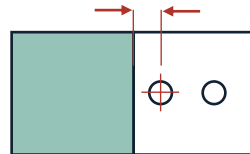
Variante 1

Abbildung E-2: Lösungskonzept 2 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 61))

Bei einer sehr eingeschränkten Anzahl an unterschiedlichen Greifermodulen, steigert Lösungskonzept 2 die Variantengerechtheit. Aufgrund der weiterhin großen Unterschiede in den Schnittstellen der Greifermodule zum Finger wird zunächst Lösungskonzept 1 gewählt. Die Variante bei der die Schnittstellen gestapelt werden wird aufgrund der fehlenden Auswirkungen auf die Variantengerechtheit und den Risiken in Bezug auf Störkontur und Fertigungskomplexität nicht weiterverfolgt. Die Komponentenkarte des Moduls A bleibt damit den Unterscheidungsmerkmalen *maximale Öffnungsweite* und *Greifermodell* zugeordnet (A_Meschter, 2021, S. 59–60).

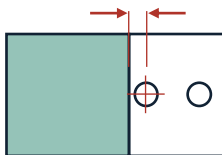
Die zweite Komponentenkarte im VAM adressiert den Abstand zwischen der Baukastenschnittstelle und des Anschlussbildes zur Grundbacke des Greifermoduls. Eine Möglichkeit (**Lösungskonzept 3**) ist die Definition eines Standardabstandes wodurch die Varianz bei den Bohrungsabständen auf der Ebene der Wirkelemente entfallen würde. Alternativ kann die maximale Öffnungsweite mit **Lösungskonzept 4** durch verschiedene Modultypvarianten mit unterschiedlichen Abständen beeinflusst werden. Eine Kombination von mehreren Bohrungsabständen bei nur einer Variante ermöglicht **Lösungskonzept 5** bei dem mehrere Bohrungsabstände auf einem Modul integriert werden. Die Varianz bei den Bohrungsabständen wird über eine Standardkomponente

realisiert und das Wirkelement entfällt. Jedoch sind die Lösungskonzepte 5 und 6 aufwändiger in der Herstellung, wobei der Einfluss auf die Fingergeometrie eher gering im Vergleich zu einer Auskrägung des Fingers ist. Daher wird Lösungskonzept 4 weiterverfolgt (A_Meschter, 2021, S. 61f.).

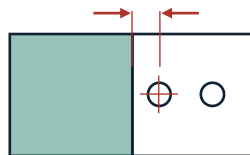


Variante 1

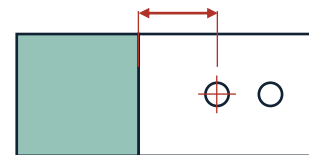
Abbildung E-3: Lösungskonzept 3 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 61))



Variante 1

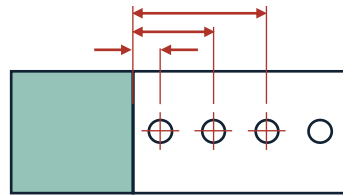


Variante 2



Variante 3

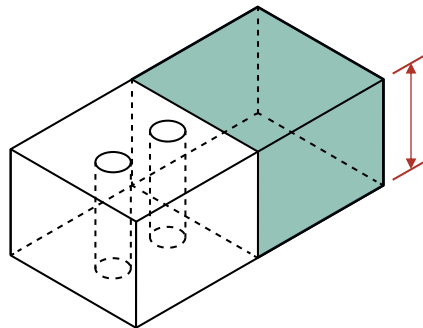
Abbildung E-4: Lösungskonzept 4 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 61))



Variante 1

Abbildung E-5: Lösungskonzept 5 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 62))

Unterschiedliche Höhen der Fingerbasis beeinflussen die Fingerlänge. **Lösungskonzept 6** sieht die Verwendung von einer standardisierten Höhe vor. **Lösungskonzept 7** andererseits, besteht aus mehreren Basisplatten mit unterschiedlichen Höhen. Dies beeinflusst die Fingerlänge und ordnet die Komponentenkarte der Basisplatte einem weiteren Unterscheidungsmerkmal zu. Dies widerspricht der geforderten Eins-zu-Eins-Zuordnung, weshalb Lösungskonzept 7 weiterverfolgt wird (A_Meschter, 2021, S. 62).



Variante 1

Abbildung E-6: Lösungskonzept 6 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 62))

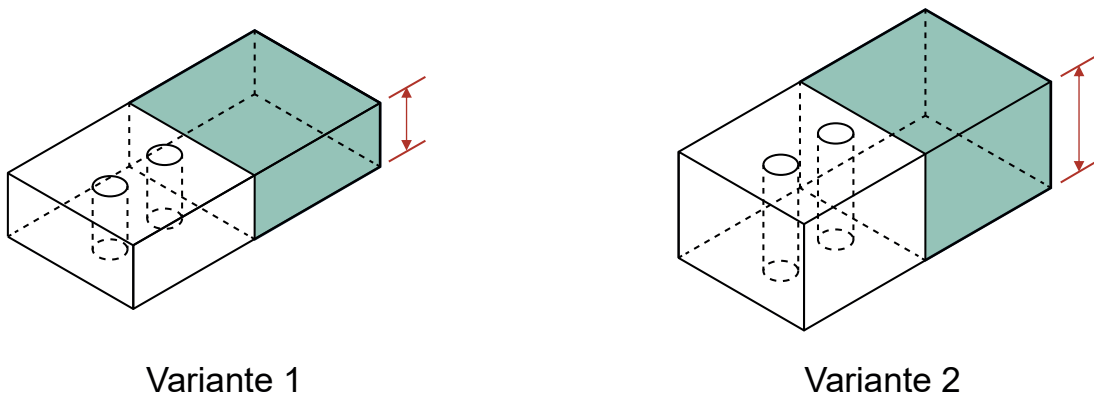


Abbildung E-7: Lösungskonzept 7 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 63))

Die Modultypen B (gerade) und C (abgewinkelt) sind optionale Komponenten, die nicht Teil jeder Fingervariante sein müssen. Modultyp B kann in vertikaler und horizontaler Richtung montiert werden und beeinflusst bei vertikaler Verwendung die Fingerlänge und bei horizontaler Verwendung die maximale Öffnungsweite und die Auskrugung. Die Mehrfachzuordnung der Komponente zu Unterscheidungsmerkmalen steht zwar der Eins-zu-Eins-Zuordnung entgegen, aber reduziert die Variantenvielfalt durch die Möglichkeit zur vielfältigen Verwendung. Eine Auskrugung in Greifrichtung oder orthogonal dazu wird mit einem abgewinkelten Modul vom Typ C erreicht. Da eine Auskrugung unabhängig von der Richtung immer mit einer Änderung der Fingerlänge einhergeht, lässt sich eine Eins-zu-Eins-Zuordnung nicht erreichen. Auch eine Differenzierung in Anteile, die nur einem Unterscheidungsmerkmal zugeordnet werden können, ist nicht möglich, weshalb das VAM sich bei den Modultypen B und C nicht verändert. Eine weitere Möglichkeit ist die Integration varianter Komponenten (vgl. Kipp, 2012, S. 102), d.h. die Vereinigung mehrerer varianter Komponenten mithilfe einer Integralbauweise. Voraussetzung ist, dass die Komponenten nicht räumlich voneinander getrennt sind. Für die Komponenten *gerades Modul* (Typ B) und *abgewinkeltes Modul* (Typ C) sind die Lösungskonzepte 9 bis 17 möglich. Beim geraden Fingermodul sind beliebig viele Längenabstufungen möglich, die nur durch die maximale Fingerlänge und die minimale Höhe der Basisplatte begrenzt wird. Das gerade Modul wird als Baureihe mit einer noch zu definierenden Anzahl an Varianten ausgeführt (**Lösungskonzept 8**) (A_Meschter, 2021, S. 66–67).

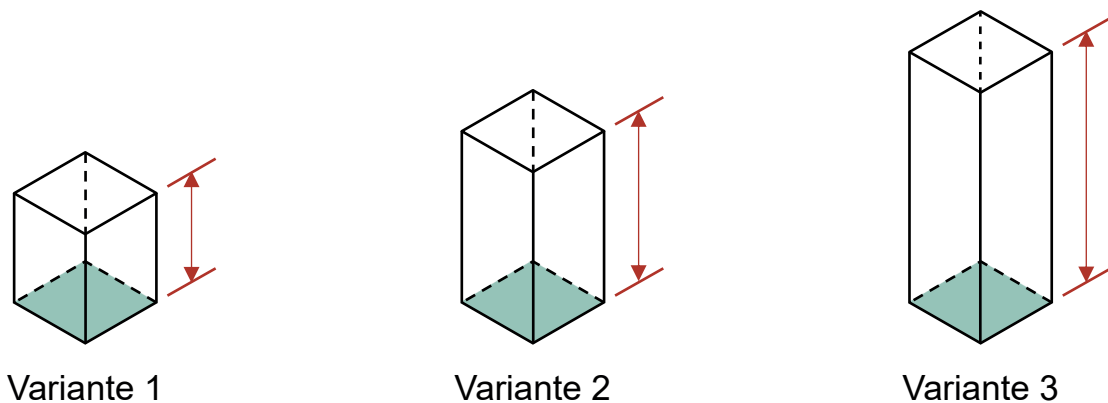
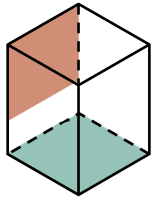
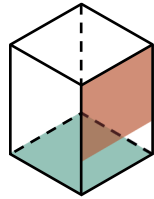


Abbildung E-8: Lösungskonzept 8 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 67))

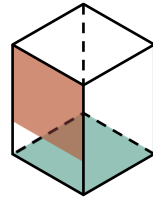
Für eine Auskrägung des Greiferfingers sind prinzipiell vier Richtungen möglich. **Lösungskonzept 9** sieht daher eine Variante für jede Richtung vor (s. folgende Abbildung zu Lösungskonzept 9) Die Schnittstelle zu einem vorgelagerten Modul ist in Grün und die zu einem nachgelagerten Modul ist in Rot dargestellt. Die Schnittstelle zu einem Nachfolgemodul befindet sich oberhalb der Eingangsschnittstelle ohne Versatz. Die Größe der Module ist standardisiert. Das VAM bleibt unverändert. **Lösungskonzept 10** integriert jeweils zwei Varianten in einem Modul, sodass seitliche Auskrägungen mit einem Modul und Auskrägung orthogonal zur Greifrichtung durch ein anderes Modul realisiert werden können. Die Karte *Richtung der Schnittstelle* kann auf der Ebene der Wirkelemente entfernt werden. Eine weitere Integration bietet **Lösungskonzept 11** bei dem alle vier Richtungen in einem Modul mit festgelegter Höhe integriert werden. Das Modul ermöglicht Auskrägungen in alle vier Richtungen, sodass die Wirkelementkarte *Richtung der Schnittstelle* im VAM entfällt. Die Varianten von **Lösungskonzept 12** kombinieren das gerade Fingermodul in einer Längenabstufung oder als Baureihe mit den Varianten des abgewinkelten Moduls in vier Varianten (mit Lösungskonzept 10), zwei Varianten (mit Lösungskonzept 11) und einer Variante (mit Lösungskonzept 12) (A_Meschter, 2021, S. 67–68).



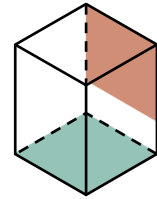
Variante 1



Variante 2



Variante 3



Variante 4

Abbildung E-9: Lösungskonzept 9 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 67))

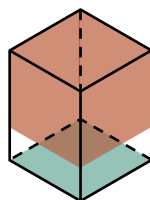


Variante 1



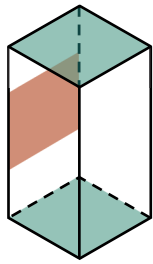
Variante 2

Abbildung E-10: Lösungskonzept 10 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 67))

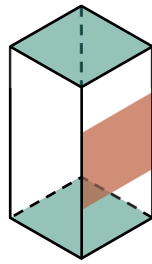


Variante 1

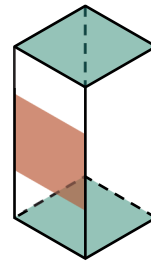
Abbildung E-11: Lösungskonzept 11 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 68))



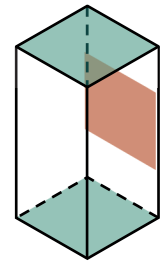
Variante 1



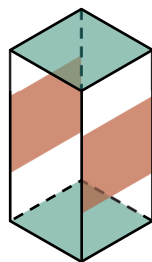
Variante 2



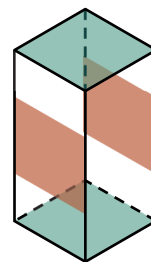
Variante 3



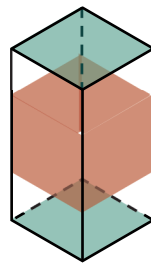
Variante 4



Variante 1



Variante 2



Variante 1

Abbildung E-12: Lösungskonzept 12 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 68))

Die horizontalen Schnittstellen sind mittig zwischen der oberen und unteren Schnittstelle platziert. Im VAM können die Komponentenkarten für das gerade und das abgewinkelte Fingermodul zu einer Karte zusammengefasst werden. Durch die Verwendung einer Standardgröße entfällt die Wirkelementkarte *Länge des Fingermoduls*. Können die Schnittstellen aller vier Richtungen und die des geraden Moduls in einem Modul kombiniert werden, so entfällt die Wirkelementkarte *Richtung der Schnittstelle* (A_Meschter, 2021, S. 68).

Einen horizontalen Versatz zwischen Eingangs- und Ausgangsschnittstelle des Moduls realisieren die Lösungskonzepte 13 bis 16. Ähnlich zu den Lösungskonzepten 9 bis 12 umfasst **Lösungskonzept 13** vier Varianten, **Lösungskonzept 14** zwei Varianten und **Lösungskonzept 15** eine Variante. **Lösungskonzept 16** kombiniert die drei vorherigen Konzepte mit einem geraden Modul. Durch den Versatz kann die Höhe der Module reduziert werden, jedoch wirkt sich dieser negativ auf die Breite des Moduls aus. Lösungskonzept 16 ermöglicht mit der Kombination eines geraden Moduls mit den Lösungskonzepten 14 und 15 beidseitige Auskragungen. (A_Meschter, 2021, S. 69).

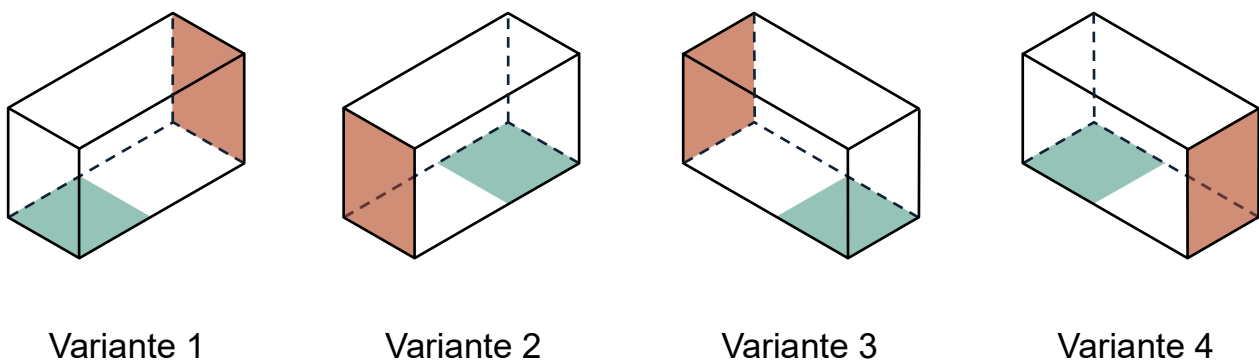


Abbildung E-13: Lösungskonzept 13 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 69))

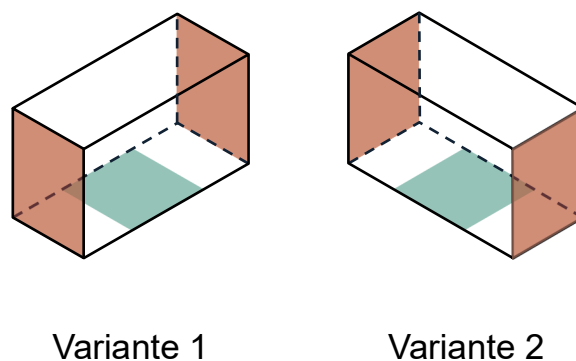
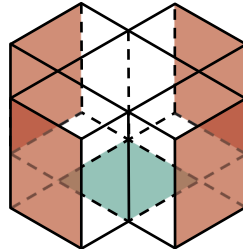


Abbildung E-14: Lösungskonzept 14 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 69))

Die einzelnen Komponentenkarten für das gerade und das abgewinkelte Fingermodul werden im VAM zusammengefasst. Die Wirkelementkarte *Länge des Fingermoduls* kann zudem entfallen, wenn die Länge des geraden Anteils des Moduls eine standardisierte Länge verwendet wird

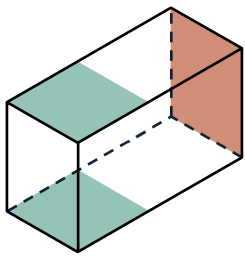
Analog zu Lösungskonzept 12 entfällt die Wirkelementkarte *Richtung der Schnittstelle*, falls die Schnittstellen aller vier horizontalen Richtungen und die des geraden Moduls in einem Modul kombiniert werden können.



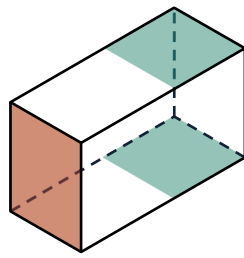
Variante 1

Abbildung E-15: Lösungskonzept 15 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 70))

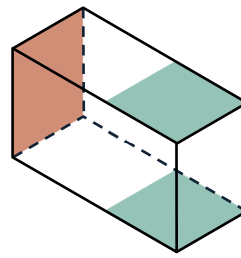
Zur Realisierung der Lösungskonzepte 9 bis 12 sowie 13 bis 17 müssen bis zu sechs Schnittstellen in ein Modul integriert werden. Die Realisierung des gewählten Schnittstellenkonzeptes, bestehend aus den Zapfen des SCHUNK BSWS-50 und den federbelasteten Steckverbindern, ist fertigungstechnisch anspruchsvoll. Zudem vergrößern die Lösungskonzepte 12 und 16 erheblich die Störkontur der Finger und die Lösungskonzepte 13 bis 16 schränken durch das feste Maß der Auskrägung die Fingerkonfigurationen ein. Aufgrund der fertigungstechnischen Komplexität sowie der vergrößerten Störkontur der Fingermodule mit mehr als einer Ein- und einer Ausgangsschnittstelle wird Lösungskonzept 9 weiterverfolgt.



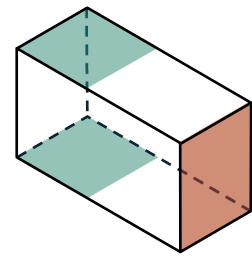
Variante 1



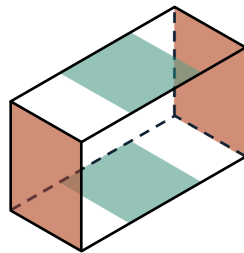
Variante 2



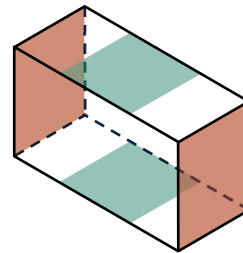
Variante 3



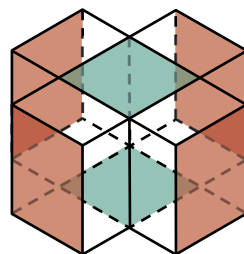
Variante 4



Variante 1



Variante 2



Variante 1

Abbildung E-16: Lösungskonzept 16 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 70))

Die Fingerspitze (Modultyp D) ändert sich bei Veränderungen der Wirkfläche (Greifeinsatz) und der Sensorik. **Lösungskonzept 17** erzeugt für jede Sensor-Wirkflächen-Kombination eine neue Variante. Durch die nahezu unendliche Anzahl an Handhabungsobjekten und Greifpositionen auf diesen Handhabungsobjekten entstehen hier sehr viele Varianten. Im VAM wird die Komponentenkarte des Modultyps D dem Wirkelement der Modullänge zugeordnet, sodass Modultyp D zusätzlich das Unterscheidungsmerkmal *Fingerlänge* beeinflusst. Durch Differenzialbauweise wird die

Fingerspitze in **Lösungskonzept 18** in die zwei Komponenten Modul und Wirkfläche zerlegt. Über eine standardisierte Schnittstelle können beide Komponenten miteinander verbunden werden. Die Variantenanzahl reduziert sich auf die Vielfalt der Sensoren für die jeweils eine Variante erzeugt wird. Durch die Aufteilung wird die Komponentenkarte Greifeinsatz auf der untersten Ebene des VAM eingefügt, die dem Unterscheidungsmerkmal *Greifeinsatz* zugeordnet ist. Das VAM entspricht auf der rechten Seite dem Idealbild. **Lösungskonzept 19** reduziert die Variantenvielfalt weiter indem alle Sensoren in einem einheitlichen Modulkörper unterbracht werden können. Im Vergleich zu Lösungskonzept 18 ist die äußere Gestalt von Komponente D1 für jede Variante identisch und die Aufteilung in zwei Komponenten aus Lösungskonzept 18 bleibt erhalten. Lösungskonzept 19 steigert demnach die Variantengerechtigkeit der Fingerspitze am stärksten und wird ausgewählt (A_Meschter, 2021, S. 63–65).

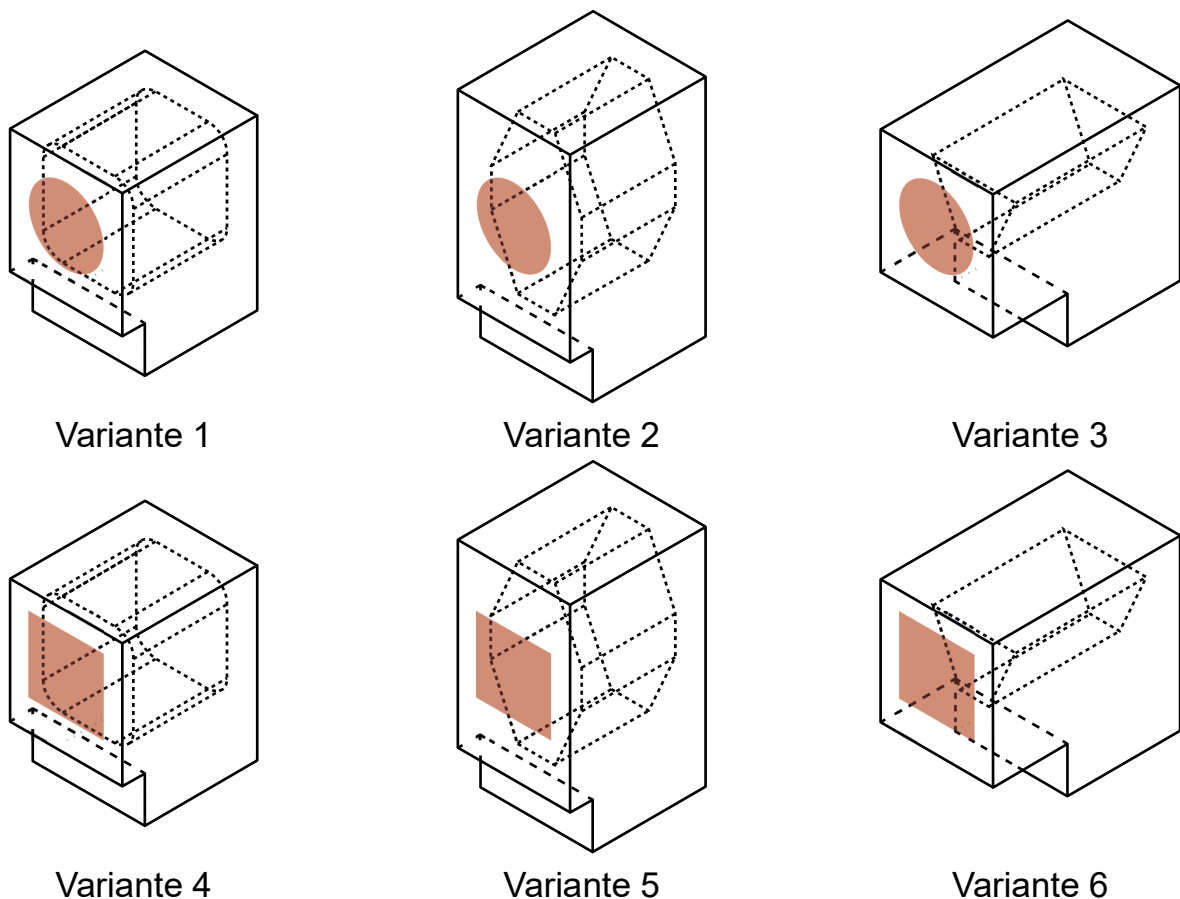


Abbildung E-17: Lösungskonzept 17 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 64))

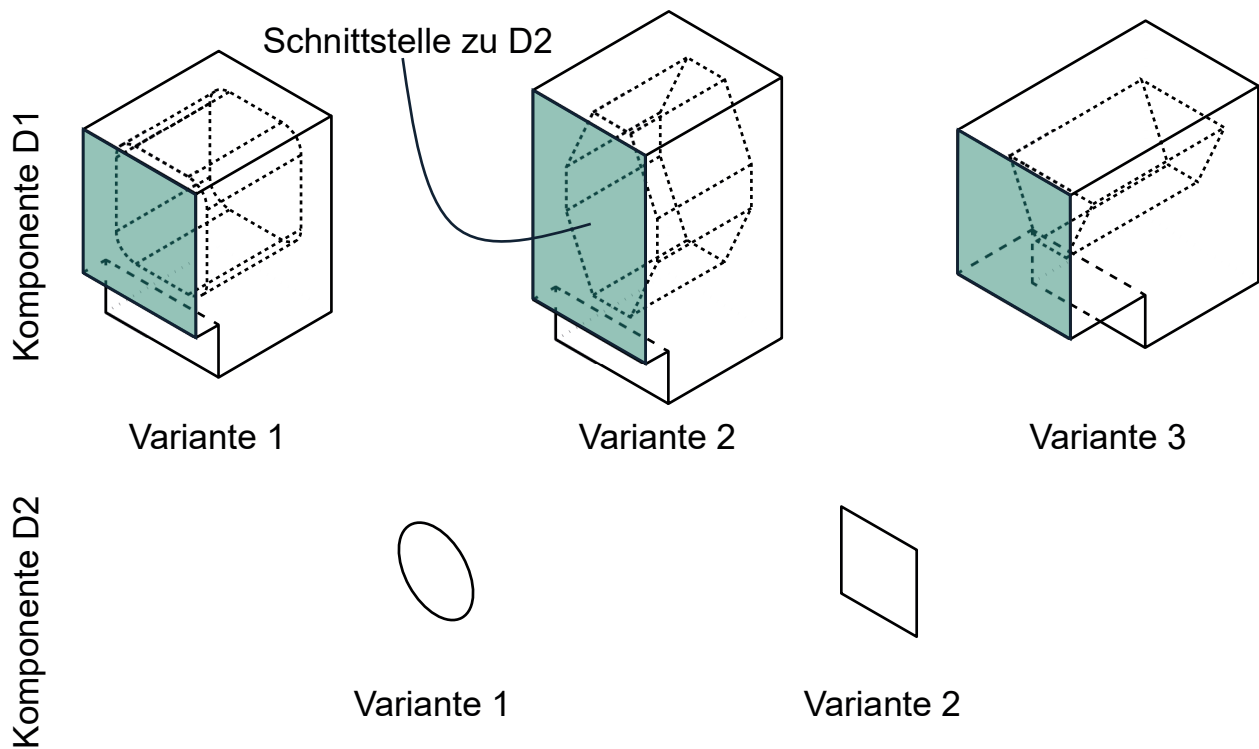


Abbildung E-18: Lösungskonzept 18 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 64))

Durch die Wahl der genannten Lösungskonzepte verändert sich das VAM: Die Fingerbasis entfällt als Standardkomponenten je Greifermodell. Hierdurch entspricht das Unterscheidungsmerkmal *Greifermodell* dem Idealzustand. Die Zerlegung der Fingerspitze in zwei Komponenten überführt zudem die Unterscheidungsmerkmale *Greifeinsatz* und *Sensorik* in den Idealzustand. Eine weitere Iteration können keine neuen Lösungsansätze identifiziert, weshalb mit der Ebene der Wirkprinzipien fortgefahren wird.

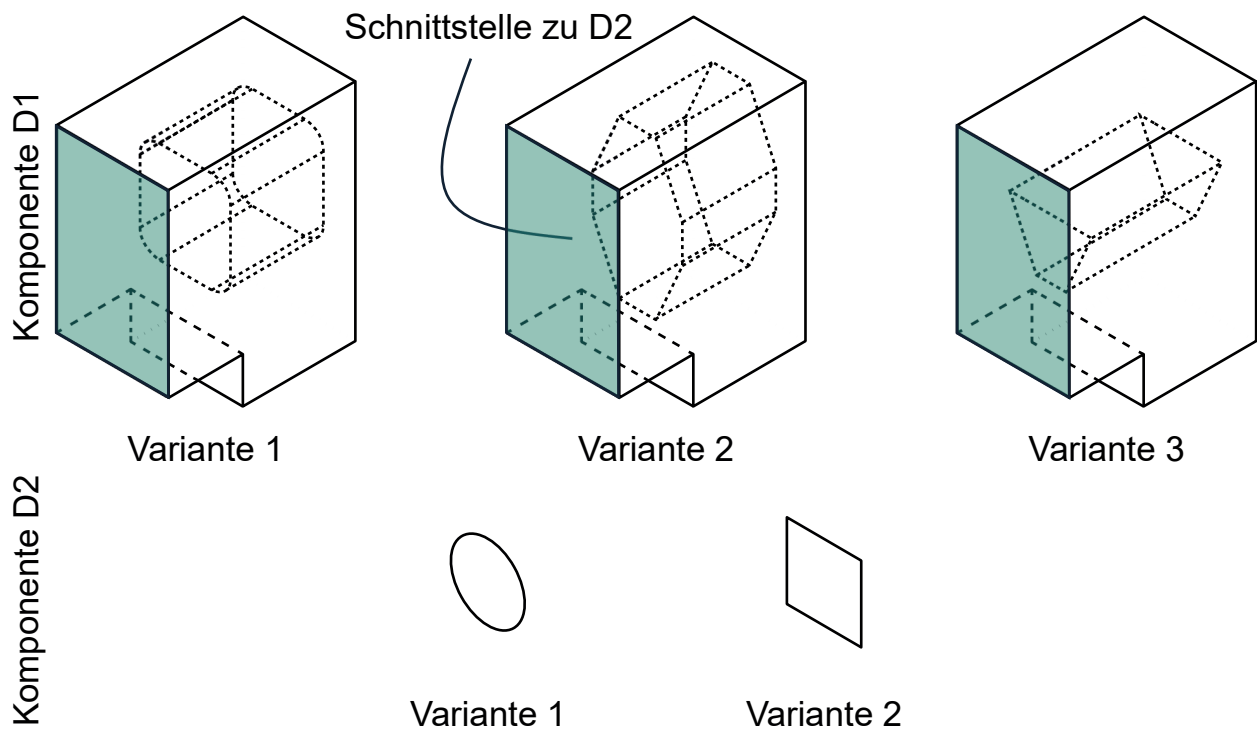
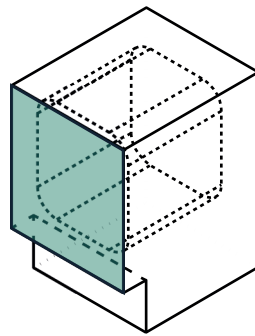


Abbildung E-19: Lösungskonzept 19 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 65))

Lösungskonzepte auf der Ebene der Wirkprinzipien

Auf der Ebene der Wirkprinzipien kann die Variantengerechtheit durch das Ersetzen variante Wirkprinzipien durch variante Wirkelemente, das Verlagern von physischer Vielfalt in Softwareanteile oder das Abbilden von Vielfalt durch weniger oder einfachere Wirkelemente erreicht werden. Bezogen auf die Greiferfinger kann das Verlagern von physischer Vielfalt in Softwareanteile für die Fingerspitze umgesetzt werden. **Lösungskonzept 21** besteht aus einer Modulvariante mit einem Sensor, der die Möglichkeit z.B. zum Messen von Kräften, Schlupf und Abständen ermöglicht. Über Software kann das jeweilige Sensorprinzip ausgewählt und verwendet werden. Da für Lösungskonzept 21 ein Sensor gesucht oder entwickelt werden muss, der mehrere Sensorarten abbilden kann und die notwendigen Größen ausreichend erfassen kann, wird das Lösungskonzept zunächst nur in den Ausblick für weitere Optimierungsmöglichkeiten der variantengerechten Produktgestaltung des Greiferfingerbaukastens aufgenommen. Das VAM bleibt unverändert (A_Meschter, 2021, S. 72).



Variante 1

Abbildung E-20: Lösungskonzept 20 (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Meschter, 2021, S. 72))

Auf der Ebene der Wirkprinzipien können keine weiteren Verbesserungen der Variantengerechtigkeit identifiziert werden, weshalb die Suche auf der Ebene der Funktionen fortgesetzt wird.

Lösungskonzepte auf der Ebene der Funktionen

Auf der Ebene der Funktionen im VAM ist es das Ziel eine möglichst übergreifende Eins-zu-Eins-Zuordnung zwischen den Unterscheidungsmerkmalen und Funktionen zu erreichen. In dem ermittelten VAM ist diese Zuordnung bereits erreicht, sodass nicht nach alternativen Lösungskonzepten gesucht werden muss.

Lösungskonzepte auf der Ebene der Unterscheidungsmerkmale

Auf der obersten Ebene des VAM kann die Variantengerechtigkeit durch die Neudefinition der Ausprägungen der Unterscheidungsmerkmale gesteigert werden. Dies ist erforderlich, wenn die bestehenden Ausprägungen entweder die Anforderungen nicht erfüllen oder sich nicht als Grundlage für eine konfigurierbare Produktfamilie eignen. Ausgang für die Neudefinition ist das Festlegen einer oberen und unteren Grenze des Bereichs. Die Ausprägungen zwischen diesen Grenzen kann auf drei Arten erfolgen:

- Ermitteln neuer Ausprägungen durch Anwendung geometrischer Normzahlreihen
- Manuelles Ableiten von Ausprägungen aus den Anwenderbedürfnissen
- Festlegen neuer Ausprägungen durch Anwendung einer numerischen Optimierung

Die Fingerbasis (Modultyp A), die abgewinkelten Fingermodule (Modultyp C) und die Fingerspitze (Modultyp D) werden nach den ausgewählten Lösungskonzepten in einer

jeweiligen Einheitsgröße in den Baukasten integriert. Das gerade Fingermodul (Modultyp B) beeinflusst die drei Unterscheidungsmerkmale *Fingerlänge*, *Auskrägung* und *maximale Öffnungsweite* und wird gemäß Lösungskonzept 9 als Baureihe mit verschiedenen und noch nicht definierten Längenabstufungen ausgeführt. Das Ableiten der Ausprägungen aus den Anwenderbedürfnissen oder durch eine numerische Optimierung setzt sehr gute Kenntnisse und eine geeignete Datenlage zu den Anwenderbedürfnissen voraus, die in diesem Fall nicht vorliegen. Daher erfolgt das Festlegen der Längenausprägungen durch die Anwendung geometrischer Normzahlreihen (A_Meschter, 2021, S. 72).

Normzahlreihen sind geometrische Folgen mit einem konstanten, prozentualen Zuwachs, genannt Stufensprung φ . Der Stufensprung ergibt sich zu

$$\varphi = \sqrt[z-1]{B}$$

mit z für die Anzahl der Größenstufen und dem abzudeckenden Bereich B als Quotient aus der größten und kleinsten Ausprägung.

Die erste Ausprägung einer Normreihe bildet immer die kleinste zulässige Ausprägung. Durch den Stufensprung als prozentualer Zuwachs sind die Abstände zwischen den Ausprägungen am unteren Ende der Reihe kleiner als am oberen Ende. Mit der Anwendung der Normalzahlreihen sollen die Größenstufen z , die einzelnen Ausprägungen sowie die Anzahl identischer Größenstufen i der geraden Module ermittelt werden, die Teil des Baukastens werden. Für den Wert von z ist ein sinnvoller Kompromiss zwischen dem Wunsch nach großen Stückzahlen (kleines z) auf der einen, und der exakten Erfüllung der Kundenwünsche (großes z) auf der anderen Seite zu suchen, wobei mit einem Wert zwischen 3 und 6 begonnen werden kann (Kipp, 2012, S. 117; A_Meschter, 2021, S. 77). Zur Ermittlung der genannten Größen müssen die größte und kleinste Ausprägung ermittelt werden. Diese ergibt sich aus der maximal zulässigen Fingerlänge der Greifermodelle, der Höhe des Basismoduls, der Höhe der Fingerspitze und den Maßen der Schnittstelle. Die maximal zulässige Fingerlänge kann den Produktspezifikationen der Greifmodulhersteller entnommen werden. Diese beträgt für den SCHUNK EGL 90 160 mm und für den SCHUNK EGI 80 200 mm. Das gewählte Schnittstellenkonzept bestimmt die minimale Ausprägung der Modullänge. Die folgende Abbildung zeigt das für die FEM-Simulationen verwendete vereinfachte Modell eines Fingermoduls und den montierten Komponenten des BSWS 50. Die vertikalen Maße der

Schnittstelle am oberen und unteren Modulende ergibt zusammen 21 mm. Berücksichtigt man noch den Bohrerauslauf bei beiden Bohrungen, so kann die minimale Modullänge mit 22 mm festgelegt werden.

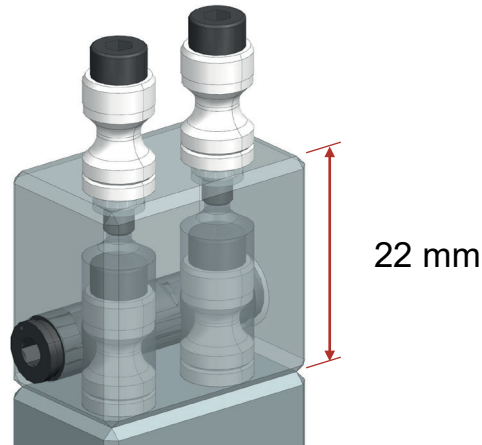


Abbildung E-21: Minimale Modullänge

Da sowohl die Basisplatte A als auch die Fingerspitze D noch nicht ausgestaltet sind, werden zunächst Annahmen getroffen. Die so ermittelten Modulgrößen müssen nach der Ausgestaltung der Module noch einmal überprüft werden. Für die Basisplatte wird eine Höhe von 10 mm und für die Fingerspitze eine Höhe von 30 mm angenommen (A_Meschter, 2021, S. 77).

Tabelle E-1: Angaben zur Ermittlung der geometrischen Normzahlreihen

maximal zulässige Fingerlänge	Höhe der Basisplatte	Höhe der Fingerspitze	Kleinste Ausprägung	Größte Ausprägung	Bereich B
200 mm	10 mm	30 mm	22 mm	160 mm	7,2727

Mit den Angaben kann der Stufensprung φ für verschiedene Größenstufen z ermittelt werden.

Tabelle E-2: Stufensprung φ für verschiedene Größenstufen

Größenstufe z	Stufensprung φ
3	2,6968
4	1,9375
5	1,6422
6	1,4871

Tabelle E-3: Modulausprägungen bei verschiedenen Größenstufen

z	φ	Ausprägungen					
		a	b	c	d	e	f
3	2,6968	22 mm	59 mm	160 mm			
4	1,9375	22 mm	43 mm	83 mm	160 mm		
5	1,6422	22 mm	36 mm	59 mm	97 mm	160 mm	
6	1,4871	22 mm	33 mm	49 mm	72 mm	108 mm	160 mm

Durch Kombination der Ausprägungen (a - f) je Größenstufe können (gerade) Fingerkonfigurationen ermittelt werden. Die folgende Tabelle zeigt die ermittelten Fingerkombinationen für drei Größenstufen.

Tabelle E-4: Realisierbare Fingerkonfigurationen ohne Auskragung bei drei Größenstufen des gera-den Moduls

Mögliche Kombinationen	Fingerlänge
Basisplatte und Fingerspitze	40 mm
1·a	62 mm
2·a	84 mm
1·b	99 mm
3·a	106 mm
1·a, 1·b	121 mm
4·a	128 mm
2·a, 1·b	143 mm
5·a	150 mm
2·b	158 mm
3·a, 1·b	165 mm
6·a	172 mm
1·a, 2·b	180 mm
4·a, 1·b	187 mm
7·a	194 mm
1·c	200 mm

Die Möglichkeiten umfassen nur Kombinationen, die die maximale Fingerlänge von 160 mm bzw. 200 mm mit Fingerspitze und Basisplatte nicht überschreiten. Abhängig von der Anzahl identischer Größenstufen i verändert sich die Anzahl der möglichen Konfigurationen. Einen Überblick über die Konfigurationen bei $i = 2 - 6$ für $z = 3$ zeigen die folgenden beiden Tabellen. Diese zeigen auf, in wie fern sich die Anzahl an Konfigurationen verändert, wenn die Anzahl an gleichen Modulen reduziert wird. Gerade bei einer größeren Anzahl an Abstufungen (z) kann die Anzahl gleicher Module reduziert werden, ohne dass wesentliche Fingerlängen nicht mehr abgebildet werden können.

Tabelle E-5: Zulässige Fingerkonfigurationen für $z = 3$ bei 4, 5 oder 6 identischen Größenstufen (i)

$i = 6$		$i = 5$		$i = 4$	
Module	Fingerlänge	Module	Fingerlänge	Module	Fingerlänge
Basisplatte und Finger- spitze	40 mm	Basisplatte und Finger- spitze	40 mm	Basisplatte und Finger- spitze	40 mm
1·a	62 mm	1·a	62 mm	1·a	62 mm
2·a	84 mm	2·a	84 mm	2·a	84 mm
1·b	99 mm	1·b	99 mm	1·b	99 mm
3·a	106 mm	3·a	106 mm	3·a	106 mm
1·a, 1·b	121 mm	1·a, 1·b	121 mm	1·a, 1·b	121 mm
4·a	128 mm	4·a	128 mm	4·a	128 mm
2·a, 1·b	143 mm	2·a, 1·b	143 mm	2·a, 1·b	143 mm
5·a	150 mm	5·a	150 mm	5·a	150 mm
2·b	158 mm	2·b	158 mm	2·b	158 mm
3·a, 1·b	165 mm	3·a, 1·b	165 mm	3·a, 1·b	165 mm
6·a	172 mm	6·a	172 mm	1·a, 2·b	180 mm
1·a, 2·b	180 mm	1·a, 2·b	180 mm	4·a, 1·b	187 mm
4·a, 1·b	187 mm	4·a, 1·b	187 mm	1·c	200 mm
7·a	194 mm	1·c	200 mm		
1·c	200 mm				
Konfigurationen	16	Konfigurationen	15	Konfigurationen	14

Tabelle E-6: Zulässige Fingerkonfigurationen für $z = 3$ bei 2, 3 oder 4 identischen Größenstufen (i)

$i = 3$		$i = 2$	
Module	Fingerlänge	Module	Fingerlänge
Basisplatte und Finger- spitze	40 mm	Basisplatte und Finger- spitze	40 mm
1·a	62 mm	1·a	62 mm
2·a	84 mm	2·a	84 mm
1·b	99 mm	1·b	99 mm
3·a	106 mm	3·a	106 mm
1·a, 1·b	121 mm	1·a, 1·b	121 mm
4·a	128 mm	2·a, 1·b	143 mm
2·a, 1·b	143 mm	2·b	158 mm
2·b	158 mm	3·a, 1·b	165 mm
3·a, 1·b	165 mm	1·a, 2·b	180 mm
1·a, 2·b	180 mm	1·c	200 mm
4·a, 1·b	187 mm		
1·c	200 mm		
Konfigurationen	13	Konfigurationen	11

Für die betrachteten Größenstufen vier bis sechs ergeben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle E-7: Anzahl an Fingerkonfigurationen für die betrachteten Größenstufen



identischen Größenstufen i	Größenstufen z			
	3	4	5	6
2	9	15	27	40
3	11	21	34	44
4	13	23	38	44
5	14	25	40	44
6	15	26	41	44

Es ist erkennbar, dass bei jeder Anzahl an Größenstufen und gerade bei identischen Größenstufen von vier bis sechs maximal drei zusätzliche Ausprägungen erreicht werden können. Damit liefert ein Baukasten mit fünf oder mehr Modulen einer Größenstufe keinen wesentlichen Mehrwert. Während der FINGERKIT-Standardbaukasten lediglich vier verschiedene Fingerlängen bei Fingern ohne Auskrägung ermöglicht, bieten drei Größenabstufungen mit $i = 2$ bei den geraden Modulen schon mehr mögliche Fingerlängen. Damit ergeben sich die Modullängen 22 mm, 59 mm und 160 mm. Zu beachten ist dabei, dass mit der Modullänge von 160 mm lediglich eine Fingerlänge (200 mm) erreicht werden kann. Es wird als eine Variante des Moduls vorgehalten, um nur eine Ausprägung zu realisieren. Dies widerspricht der variantengerechten Produktgestaltung. Wird hingegen auf die Ausprägung mit 160 mm verzichtet, so kann nur noch eine maximale Fingerlänge von 187 mm ($4 \times 22 \text{ mm} + 1 \times 59 \text{ mm}$) erreicht werden.

Bei einer Unterteilung in fünf Größenstufen ergeben sich zu den bisherigen drei Größenstufen zwei Zwischenstufen von 36 mm und 97 mm. Ersetzt man die Größenstufe 160 mm mit 97 mm ergeben sich lediglich drei zusätzliche Ausprägungen. Verwendet man jedoch die Größenstufe 36 mm für die 160 mm, so ergeben sich elf zusätzliche Ausprägungen.

Tabelle E-8: Ausprägungen senkrechter Fingerlängen für $z = 3$ und $i = 2$ pro Finger

Ausprägung	Fingerlänge	Konfiguration
1	40 mm	Basis, Fingerspitze
2	62 mm	Basis, 1x 22 mm, Fingerspitze
3	76 mm	Basis, 1x 36 mm, Fingerspitze
4	84 mm	Basis, 2x 22 mm, Fingerspitze
5	98 mm	Basis, 1x 22 mm, 1x 36 mm, Fingerspitze
6	99 mm	Basis, 1x 59 mm, Fingerspitze
7	112 mm	Basis, 2x 36 mm, Fingerspitze
8	120 mm	Basis, 2x 22 mm, 1x 36 mm, Fingerspitze
9	121 mm	Basis, 1x 22 mm, 1x 59 mm, Fingerspitze
10	134 mm	Basis, 1x 22 mm, 2x 36 mm, Fingerspitze
11	135 mm	Basis, 1x 36 mm, 1x 59 mm, Fingerspitze
12	143 mm	Basis, 2x 22 mm, 1x 59 mm, Fingerspitze
13	156 mm	Basis, 2x 22 mm, 2x 36 mm, Fingerspitze
14	157 mm	Basis, 1x 22 mm, 1x 36 mm, 1x 59 mm, Fingerspitze
15	158 mm	Basis, 2x 59 mm, Fingerspitze
16	171 mm	Basis, 2x 36 mm, 1x 59 mm, Fingerspitze
17	179 mm	Basis, 2x 22 mm, 1x 36 mm, 1x 59 mm, Fingerspitze
18	180 mm	Basis, 1x 22 mm, 2x 59 mm, Fingerspitze
19	193 mm	Basis, 1x 22 mm, 2x 36 mm, 1x 59 mm, Fingerspitze
20	194 mm	Basis, 1x 36 mm, 2x 59 mm, Fingerspitze

-  Kombinationen, die mit den Modullängen 22 mm, 59 mm und 160 mm möglich sind
-  Kombinationen, die entfallen, wenn nur ein Modul mit 59 mm je Finger im Baukasten berücksichtigt wird

Wird die maximale Anzahl pro Größenstufe für die Länge von 59 mm auf eins reduziert, entfallen drei Ausprägungen, die in ihrer Fingerlänge sich um einen Millimeter von der jeweils darüberstehenden Ausprägung unterscheiden. Es kann damit festgehalten werden, dass die geraden Module in den Längen 22 mm, 36 mm und 59 mm in den Baukasten aufgenommen werden. Für jeden Finger stehen jeweils zwei Module mit den Längen 22 mm und 36 mm und ein Modul der Länge 59 mm zur Verfügung.

Die Lösungssuche auf allen Ebenen des VAM ist abgeschlossen. Aus den gewählten Lösungskonzepten kann ein Gesamtkonzept abgeleitet werden, was im Folgenden beschrieben wird.

F Beschreibung und Codierung der Basisbewegungen der Teilschrittketten „Öffnen der Kette“, „Montage eines Moduls“, „Demontage eines Moduls“, „Schließen der Kette“

Tabelle F-1: Basisbewegungen des Teilschrittes „Öffnen der Kette“ (A_Frech, 2023, S. 39)

#	Basisbewegung	Körperteil	Handhabendes Objekt
1	Hinlangen	Rechte Hand	
2	Greifen	Rechte Hand	Werkzeug
3	Hinlangen	Linke Hand	
4	Greifen	Linke Hand	Modulkette
5	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
6	Fügen	Rechte Hand	Werkzeug
7	Drehen	Rechte Hand	Werkzeug
8	Trennen	Linke Hand	Modulkette
9	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
9	Bringen	Linke Hand	Modulkette
10	Loslassen	Linke Hand	Modulkette

Tabelle F-2: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Öffnen der Kette“ (A_Frech, 2023, S. 41)

#	Basisbewegung	Distanz x [mm]	Distanz y [mm]	Distanz z [mm]	Gesamtdistanz [mm]	Codierung
1	Hinlangen	155,0	115,0	0,0	193,0	A
2	Greifen					G1C2
3	Hinlangen	312,0	84,0	400,0	514,2	A
4	Greifen					G1C1
5	Bringen	146,0	24,0	400,0	426,4	A
6	Fügen					P3
7	Drehen					T-M
8	Trennen					D_2
9	Bringen	316,0	88,0	400,0	517,3	A
9	Bringen	0,0	0,0	400	400,0	B
10	Loslassen					RL1

Tabelle F-3: Basisbewegungen des Teilschrittes „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 39)

#	Basisbewegung	Körperteil	Handhabendes Objekt
1	Hinlangen	Linke Hand	
2	Greifen	Linke Hand	Modul
3	Bringen	Linke Hand	Modul
4	Fügen	Linke Hand	Modul
5	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
6	Fügen	Rechte Hand	Werkzeug
7	Drehen	Rechte Hand	Werkzeug
8	Loslassen	Linke Hand	Modul
9	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
9	Bringen	Linke Hand	

Tabelle F-4: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Montage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 41)

#	Basisbewegung	Distanz x [mm]	Distanz y [mm]	Distanz z [mm]	Gesamtdistanz [mm]	Codierung
1	Hinlangen	18,0	107,0	0,0	108,5	A
2	Greifen					G1C1
3	Bringen	289,0	20,0	40,0	493,9	A
4	Fügen					P1
5	Bringen	318,0	85,0	40,0	518,0	A
6	Fügen					P3
7	Drehen					T-L
8	Loslassen					RL1
9	Bringen	318,0	85,0	40,0	518,0	A
9	Bringen	316,0	88,0	40,0	517,3	A

Tabelle F-5: Basisbewegungen des Teilschrittes „Demontage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 40)

#	Basisbewegung	Körperteil	Handhabendes Objekt
1	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
1	Hinlangen	Linke Hand	
2	Greifen	Linke Hand	Modul
3	Fügen	Rechte Hand	Werkzeug
4	Drehen	Rechte Hand	Werkzeug
5	Trennen	Linke Hand	Modul
6	Bringen	Linke Hand	Modul
7	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
8	Loslassen	Linke Hand	Modul
9	Hinlegen	Linke Hand	

Tabelle F-6: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Demontage eines Moduls“ (A_Frech, 2023, S. 42)

#	Basisbewegung	Distanz x [mm]	Distanz y [mm]	Distanz z [mm]	Gesamtdistanz [mm]	Codierung
1	Bringen	318,0	85,0	400,0	518,0	A
1	Hinlangen	18,0	107,0	0,0	108,5	A
2	Greifen					G1C1
3	Fügen					P3
4	Drehen					T-S
5	Trennen					D_2
6	Bringen	289,0	20,0	400,0	493,9	A
7	Bringen	318,0	85,0	400,0	518,0	A
8	Loslassen					RL1
9	Hinlegen	18,0	107,0	0,0	108,5	A

Tabelle F-7: Basisbewegungen des Teilschrittes „Schließen der Kette“ (A_Frech, 2023, S. 40)

#	Basisbewegung	Körperteil	Handhabendes Objekt
1	Hinlangen	Linke Hand	
2	Greifen	Linke Hand	Modulkette
3	Bringen	Linke Hand	Modulkette
3	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
4	Fügen	Linke Hand	Modulkette
5	Fügen	Rechte Hand	Werkzeug
6	Drehen	Rechte Hand	Werkzeug
7	Loslassen	Linke Hand	Modulkette
8	Bringen	Rechte Hand	Werkzeug
9	Loslassen	Rechte Hand	

Tabelle F-8: Codierung der Basisbewegungen für den Teilschritt „Schließen der Kette“
(A_Frech, 2023, S. 42)

#	Basisbewegung	Distanz x [mm]	Distanz y [mm]	Distanz z [mm]	Gesamtdistanz [mm]	Codierung
1	Hinlangen	312,0	84,0	0,0	323,1	A
2	Greifen					G1C1
3	Bringen	0,0	0,0	400,0	400,0	A
3	Bringen	318,0	85,0	400,0	518,0	A
4	Fügen					P1
5	Fügen					P3
6	Drehen					T-L
7	Loslassen	318,0	85,0	400,0	518,0	RL1
8	Bringen					A
9	Loslassen					RL1

Tabelle F-9: Zeitangaben der Einzelbewegungen in TMUs und die Summe der TMUs der vier Teilschritte (A_Frech, 2023, S. 43)

Öffnen der Kette		Montage eines Moduls		Demontage eines Moduls		Schließen der Kette	
#	Dauer [TMU]	#	Dauer [TMU]	#	Dauer [TMU]	#	Dauer [TMU]
1	9,6	1	6,1	1	19,0	1	10,0
2	8,7	2	7,3	1	6,1	2	7,3
3	13,1	3	19,0	2	7,3	3	15,8
4	7,3	4	10,4	3	43,0	3	19,0
5	16,5	5	19,0	4	8,5	4	10,4
6	43,0	6	43,0	5	11,8	5	43,0
7	8,5	7	16,2	6	19,0	6	16,2
8	11,8	8	2,0	7	19,0	7	2,0
9	8,1	9	19,0	8	2,0	8	19,0
9	15,6	9	19,0	9	6,1	9	2,0
10	2,0						
Σ [TMU]	136,1	Σ [TMU]	142,0	Σ [TMU]	116,7	Σ [TMU]	128,9
Σ [s]	4,889	Σ [s]	5,112	Σ [s]	4,201	Σ [s]	4,64

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkanteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasive Strahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälens

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-effizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der
Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight
production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning

Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation

Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken
Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetribspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälgwindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinenteknik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294

Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning

Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295

Dr.-Ing. Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 296

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Band 297

Dr.-Ing. Simon Mangold

Automatisierte Demontage von Schraubverbindungen für das Remanufacturing

Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 298

Dr.-Ing. Eduard Gerlitz

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von Traktionsbatterien

Band 299

Dr.-Ing. Edgar Mühlbeier

Mechatronisches Koppelsystem für die prozessunabhängige, kraftgeregelte Kopplung von seriellen Roboterkinematiken

Band 300

Dr.-Ing. Martin Benfer

Decision-Making in Production Network Configuration

A Design Framework for Digital Twins of Global Production Networks

Band 301

Dr.-Ing. Victor Lubkowitz

Keramikverstärkte Aluminiumwerkstoffe für das pulverbettbasierte selektive Laserschmelzen

Beschichtung, Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften von Mikro-B₄C- und Nano-TiC-verstärkten AlSi10Mg-Feedstocks, verarbeitet im PBF-LB-Prozess

Band 302

Dr.-Ing. Alex Frey

Datenbasierte Erstellung und Überprüfung von Modellen zur Produkt- und Prozesskonfiguration

Band 303

Dr.-Ing. Johannes Schubert

Werkstoff- und Prozessanalyse zur Herstellung keramischer Werkstoffverbunde mittels badbasierter Photopolymerisation (VPP-LED)#

Band 304

Dr.-Ing. Tassilo Arndt

Simulative und experimentelle Untersuchung des Rotationsunrunddrehens zur hochproduktiven Herstellung unrunder Bauteilquerschnitte

Band 305

Dr.-Ing. Kamal Hussein

Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen

Band 306

Dr.-Ing. Marco Friedmann

Automatisierte Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten

