

Ein flexibles Greifsystem für Roboterassistenten im Haushalt

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Kai Wegener
aus Korbach

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Tag der Einreichung:	26. April 2006
Tag der mündlichen Prüfung:	21. Februar 2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2007

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart


Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Kai Wegener



Ein flexibles Greifsystem für Roboterassistenten im Haushalt

Nr. 456

Dr.-Ing. Kai Wegener

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-10-3, ISBN (13) 978-3-939890-10-2

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2007.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und seine wertvollen Hinweise, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl danke ich für die Durchsicht der Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Dieter Schraft und Herrn Dipl.-Ing. Martin Hägele M.S. danke ich für die organisatorische Unterstützung.

Für die Durchsicht des Manuskriptes und die konstruktive Kritik danke ich Herrn Dr.-Ing. Manfred Schweizer.

Mein herzlicher Dank geht an Frau Luzia Schuhmacher für ihre redaktionelle Unterstützung.

Besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Klaus Killmann und seinem Team für die stets engagierte Unterstützung bei der Realisierung der Versuchsaufbauten und Demonstratoren.

Danken möchte ich auch meinen ehemaligen Studenten, die in Form von Praktika, Studien- und Diplomarbeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Freundschaftlicher Dank gebührt meinen ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Florian Simons, Herrn Dipl.-Math. techn. Thomas Ledermann, Herrn Dr.-Ing. Kai-Udo Modrich, Herrn Dr.-Ing. Walter Schaaf, Herrn Dr.-Ing. Johannes Wößner sowie meiner ehemaligen Arbeitsgruppe für die konstruktiven Diskussionen, die motivierenden Worte, die wertvollen Anregungen und für jede Menge Spaß bei der Arbeit!

Meinen Eltern danke ich für ihre vorbehaltlose Förderung und Unterstützung, die sie mir entgegengebracht haben. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Mein liebevoller Dank gilt meiner Freundin Mascha Doetsch für die Entbehrlichkeiten, die sie in Kauf nahm und für ihre Unterstützung während der Promotionsprozedur.

München im Mai 2007

Kai Wegener

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	18
1.1	Problemstellung	18
1.2	Zielsetzung	19
1.3	Vorgehensweise	19
2	Ausgangssituation	21
2.1	Begriffe und Definitionen	21
2.2	Stand der Technik	23
2.2.1	Roboterassistenten im Haushalt	23
2.2.2	Industrielle Greifer	25
2.2.3	Künstliche Hände	27
2.2.4	Greifmöglichkeiten der menschlichen Hand	32
2.2.5	Der Finray-Effekt	33
2.3	Folgerungen aus dem Stand der Technik	34
3	Analyse typischer Handhabungsaufgaben für Roboterassistenten im Haushalt und Ableitung von Anforderungen an ein Greifsystem zum Greifen geometrievarianter und unbekannter Objekte	36
3.1	Methode zur Analyse von Greifobjekten	36
3.1.1	Segmentierung realer Greifobjekte	36
3.1.2	Approximation von Regelgeometrien an die segmentierten Greifobjekte	37
3.2	Analyse der Handhabungsaufgabe beim Servieren von Getränken	38
3.3	Analyse der Handhabungsaufgabe beim Ausräumen einer Spülmaschine	40
3.4	Analyse der Handhabungsaufgabe beim Holen und Bringen von Gebrauchsgegenständen	42

3.5	Analyse von Armkinematiken für Roboterassistenten	43
3.6	Analyse der steuerungstechnischen Integrationsmöglichkeiten von Werkzeugen in Roboterassistenten	45
3.7	Analyse der Einsatzszenarien von künstlichen Händen	46
3.8	Folgerungen aus den Analyseergebnissen	48
3.9	Zusammenfassung und Strukturierung der Anforderungen an ein Greifsystem zum Greifen geometrievarianter unbekannter Objekte für Roboterassistenten im Haushalt	49
3.9.1	Definition von Teilsystemen eines Greifsystems zum Greifen geometrievarianter, unbekannter Objekte für Roboterassistenten im Haushalt	49
3.9.2	Strukturierung der Anforderungen und Zuordnung zu den definierten Teilsystemen	50
4	Lösungsansätze für ein flexibles Greifsystem	52
4.1	Lösungsansätze für das Antriebssystem	52
4.2	Lösungsansätze zur Fingerkonfiguration	54
4.2.1	Fingeranordnung	54
4.2.2	Kraftübertragung und Führung	56
4.3	Lösungsansätze für das Fingersystem	57
4.4	Integration der Lösungsansätze zu Gesamtsystemvarianten	58
4.4.1	Variante 1: 2D-Linearmotor mit dreigliedrigen aktiven Fingern	58
4.4.2	Variante 2: 2-Finger-Greifer mit elastischen „Netzfingern“	60
4.4.3	Variante 3: 3-Finger-Greifer mit selbstadaptiven, passiven Fingern	61
4.5	Bewertung der Gesamtsystemvarianten	62
5	Theoretische Untersuchung einer n-gliedrigen, selbstadaptiven Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt hinsichtlich ihrer Greifmöglichkeiten	64
5.1	Prinzipieller Ablauf eines Greifvorganges	64

5.2	Ermittlung, Klassifizierung und Eingrenzung der Einflussfaktoren auf eine n-gliedrige, selbstadaptive Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt	65
5.3	Entwicklung eines mechanischen Ersatzmodells für eine n-gliedrige, selbstadaptive Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt	66
5.4	Ermittlung der grundlegenden Zusammenhänge	67
5.4.1	Gesamtlänge, Länge der Querstreben und inertialer Winkel	67
5.4.2	Anzahl der Freiheitsgrade	68
5.4.3	Zusammenhang zwischen vorderer und hinterer Phalanx der Fingerkinematik	69
5.4.4	Zwangsführung der Fingerspitze	70
5.4.5	Kollisionsbetrachtung zur selbstadaptiven Fingerkinematik	71
5.4.6	Berechnung der Lagerreaktionen und der Kontaktkräfte in den einzelnen Gliedern	73
5.5	Simulation der Greifbewegung einer n-gliedrigen, selbstadaptiven Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt	76
5.5.1	Aufbau der Simulationsumgebung	76
5.5.2	Betrachtung des Bewegungszustandes	76
5.5.3	Betrachtung des Gleichgewichtszustandes	77
5.5.4	Folgerungen aus den Simulationsergebnissen	79
5.6	Folgerungen aus der theoretischen Untersuchung der Fingerkinematik	79
6	Entwicklung eines Iterations-Verfahren zur Berechnung der Gleichgewichtslage und der dort auftretenden Kontaktkräfte zwischen Fingerkinematik und Greifobjekt aus 3D-Sensor-daten	80
6.1	Datenmodell für die zu greifenden Objekte	80
6.2	Abgrenzung zu Planungsverfahren zur Ermittlung von Fingerkonfigurationen	80
6.3	Ermittlung der Startposition zwischen Fingerkinematik und Objekt	81
6.4	Iterationsverfahren zur Simulation der Greifbewegung	81
6.4.1	Ablauf der Iteration	81
6.4.2	Berechnung der Fingergliedwinkel	83

6.5	Modellrechnung	84
6.6	Experimentelle Untersuchungen zur Verifikation des Iterations-verfahren zur Berechnung der Gleichgewichtslage und der dort auftretenden Kontaktkräfte zwischen Fingerkinematik und Greifobjekt aus 3D-Sensordaten	85
6.6.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	85
6.6.2	Versuchsergebnisse	86
6.7	Folgerungen	88
7	Realisierung und Verifizierung von Gesamtsystemvarianten	89
7.1	Aufbau und Erprobung der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I	89
7.1.1	Fingerkonfiguration	90
7.1.2	Antriebsauslegung	91
7.1.3	Steuerung	92
7.1.4	Technische Daten der IPA-Hand I	93
7.1.5	Versuchsaufbau	94
7.1.6	Durchführung von Greifversuchen mit der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I	94
7.1.7	Folgerungen aus den Versuchen	95
7.2	Aufbau und Erprobung der Gesamtsystemvariante IPA-Hand II	95
7.2.1	Fingerkonfiguration	96
7.2.2	Steuerung der IPA-Hand II	97
7.2.3	Technische Daten der IPA-Hand II	98
7.2.4	Versuchsaufbau	98
7.2.5	Durchführung von Greifversuchen mit der IPA-Hand II	99
7.2.6	Folgerungen aus den Versuchen	104
8	Zusammenfassung und Ausblick	106
9	Summary	109

10 Literaturverzeichnis	112
10.1 Bücher, Zeitschriften und Artikel	112
10.2 Internetseiten	120
10.3 Schutzrechte	121

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

1D	Eindimensional, d.h. einen Freiheitsgrad der Bewegung
2D	Zweidimensional, d.h. zwei Freiheitsgrade der Bewegung
3D	Dreidimensional, d.h. drei Freiheitsgrade der Bewegung
A_i	Anforderung mit laufendem Index i
A/D	Analog/Digital
$AL_{A,B}$	Auflagerpunkte A und B
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
CSG	Constructive Solid Geometry
D_i	Daumen mit laufendem Index i
D	Direktantrieb
DIST	Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Telematica
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOF	Degrees Of Freedom (Anzahl der Freiheitsgrade)
EA	Elektrischer Antrieb
EAP	Elektroaktive Polymere
F_i	Finger mit laufendem Index i
FFS	Force-Feedback-System
FG	Fingerglied
FhG	Fraunhofer Gesellschaft
FGL	Formgedächtnislegierung
FS	Fingerspitze
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
G	Getriebe
HF	Handfläche
IB	Integrierte Bauweise
IFR	International Federation of Robotic
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
JPL	Jet Propulsion Laboratory
k.A.	keine Angabe

konst.	Konstanter Ausdruck
KP_i	Kontaktpunkt mit laufendem Index i
Li	Geschicklichkeitslevel mit Grad der Geschicklichkeit $i = 1 \dots 4$
Lin.	Linear
M	Motor
MB	Modulare Bauweise
MKS	Mehrkörpersystem
PA	Pneumatischer Antrieb
Rot.	Rotatorisch
S	Seilzug
UB	Universität von Bologna
UN/ECE	United Nations / Economic Commission for Europe

Formelzeichen in lateinischen Buchstaben

a_{Arm}	[m/s ²]	Beschleunigung der Armkinematik
$a_{BasisBacke}$	[mm]	Abstand zwischen Fingerbasis und Gegenbacke
$a_{SpitzeObjekt}$	[mm]	Abstand zwischen Objektmitte und Fingerspitze
d_{Obj}	[mm]	Durchmesser eines Greifobjektes
e	[-]	Anzahl der Freiheitsgrade der Körper eines Systems
e_i	[-]	Anzahl der Freiheitsgrade eines Einzelkörpers i
f	[-]	Anzahl der Freiheitsgrade eines Systems
$f_{Antrieb}$	[1/s]	Antriebsfrequenz
f_{Finray}	[-]	Anzahl der Freiheitsgrade der Fingerkinematik
F	[N]	Kraft allgemein
$F_{Fingerspitze}$	[N]	Greifkraft an der Fingerspitze
$F_{Greifer}$	[N]	Greifkraft
$F_{Glieder,i} / F_{Gl,i}$	[N]	Kontaktkraft des i -ten Gliedes
$F_{Knoten,x,i}$	[N]	Knotenkraft des i -ten Gliedes der vorderen Phalanx (x-Anteil)
$F_{Knoten,y,i}$	[N]	Knotenkraft des i -ten Gliedes der vorderen Phalanx (y-Anteil)
$F'_{Knoten,x,i}$	[N]	Knotenkraft des i -ten Gliedes der hinteren Phalanx (x-Anteil)
$F'_{Knoten,y,i}$	[N]	Knotenkraft des i -ten Gliedes der hinteren Phalanx (y-Anteil)
$F_{Querstab,i}$	[N]	Kraft im Querstab des i -ten Gliedes
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h_{Obj}	[mm]	Höhe eines Greifobjektes
i_{Ant}	[-]	Anthropomorpher Index
i, j, k	[-]	Allgemeine Zählvariablen

\underline{K}_i	[-]	Ortsvektor des oberen Knotens eines Gliedes an der vorderen Phalanx
\underline{K}'_i	[-]	Ortsvektor des oberen Knotens eines Gliedes an der hinteren Phalanx
l_{Obj}	[mm]	Länge eines Greifobjektes
l_{Basis}	[mm]	Abstand an der Basis der Fingerkinematik
$l_{Glieder}$	[mm]	Länge eines Gliedes
l_{Finger}	[mm]	Länge der gesamten Fingerkinematik
$l_{Querstab,i}$	[mm]	Länge eines Querstabes mit laufender Nummer i
$M_{Antrieb}$	[Nm]	Antriebsmoment
$M_{Feder,i}$	[Nm]	Drehmoment der Feder der vorderen Phalanx mit laufendem Index i
$M'_{Feder,i}$	[Nm]	Drehmoment der Feder der hinteren Phalanx mit laufendem Index i
$m_{Greifobjekt}$	[kg]	Masse des Greifobjektes
$N_{Glieder}$	[-]	Anzahl der Glieder der Fingerkinematik
$P_{Antrieb}$	[W]	Antriebsleistung
\underline{P}_{Objekt}	[-]	Vektor der messtechnisch erfassten Koordinaten eines Objektes
ρ	[-]	Anzahl der Körper eines Systems
q	[-]	Anzahl der Bindungen der Körper eines Systems
q	[mm]	Hilfsdiagonale zur Berechnung der Fingerglieder
t	[mm]	Hilfsstrecke zur Berechnung der Fingerspitze
$t_{Schließ}$	[s]	Schließzeit des Fingers
u, v, w	[mm]	Hilfsstrecken zur Berechnung der Fingerglieder
$v_{Obj,x}$	[m/s]	Objektgeschwindigkeit in x-Richtung
$v_{Obj,y}$	[m/s]	Objektgeschwindigkeit in y-Richtung
v_i	[-]	Gewichtungsfaktor zur Berechnung des anthropomorphen Index
w_i	[-]	Gewichtungsfaktor zur Berechnung des anthropomorphen Index
x_i	[mm]	Diskreter Objektpunkt (x-Koordinate)
y_i	[mm]	Diskreter Objektpunkt (y- Koordinate)
z_i	[mm]	Diskreter Objektpunkt (z- Koordinate)

Formelzeichen in griechischen Buchstaben

α	[Grad]	Hilfswinkel zur Berechnung der Fingerspitze
α_{Kipp}	[Grad]	Verschiebe- oder Kippwinkel
β_i	[Grad]	Winkel zwischen zwei Gliedern einer Kinematik
δ_i	[Grad]	Winkel an der Basis des i-ten Gliedes
$\delta_{Querstab,i}$	[Grad]	Winkel am i-ten Querstab eines Gliedes
ϑ_{warm}	[K]	Temperatur zur Erwärmung eines Stoffes
ϑ_{kalt}	[K]	Temperatur zur Abkühlung eines Stoffes
φ_{ini}	[Grad]	Initialer Winkel
φ_i	[Grad]	Winkel des i-ten Gliedes an der vorderen Phalanx
φ_i'	[Grad]	Winkel des i-ten Gliedes an der hinteren Phalanx
φ_i''	[Grad]	Hilfswinkel an der hinteren Phalanx oberhalb der Hilfsdiagonalen q
φ_i'''	[Grad]	Hilfswinkel an der hinteren Phalanx unterhalb der Hilfsdiagonalen q
κ_i	[-]	Erfüllungsgrad zur Berechnung des anthropomorphen Index
μ_{wc}	[-]	Reibkoeffizient im „worst case“
$\xi_{KP,i}$	[mm]	Abstand des i-ten Kontaktpunktes vom vorherigen Glied
$\omega_{Antrieb}$	[rad/s]	Antriebswinkelfrequenz

Häufig eingesetzte Indizes

'	Hintere Phalanx
i	Gliednummer
n	Fingerspitze
x	x-Komponente
y	y-Komponente

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Serviceroboter sollen, im Vergleich zu Industrierobotern, in der Regel keine wertschöpfenden Tätigkeiten ausüben, sondern Dienstleistungen an Menschen und Einrichtungen verrichten /Schraft 1996/. Sie sind im Gegensatz zu Industrierobotern, die seit nunmehr fast 50 Jahren ihren Dienst in der Fertigung verrichten, noch am Beginn ihrer wirtschaftlichen Entwicklung /Schraft 2004/.

Erste Produkte von Servicerobotern etablieren sich am Markt in unterschiedlichen Anwendungen. Vorreiter sind autonome Bodenstaubsauger, Rasenmäher, Roboterspielzeuge und Überwachungsroboter. Im Bericht der UN/ECE/IFR /World Robotics 2005/ wird ein Wachstum von 76 Prozent an Servicerobotern im Zeitraum zwischen 2005 und 2008 prognostiziert. Zweidrittel davon befinden sich alleine im Haushaltsbereich. Hierunter zählen neben Reinigungsrobotern und Spielzeugen auch so genannte Roboterassistenten, höher entwickelte Maschinen, die dem Menschen in seinem täglichen Leben unterstützen sollen /Schraft 2004/. Der Einsatz von Roboterassistenten als Helfer des Menschen bietet nach /Lawitzky 1999/ vielfältigen Nutzen z.B. in der Verringerung körperlicher und mentaler Belastungen.

Um dies leisten zu können, müssen Roboterassistenten über eine dem Menschen ähnliche Wahrnehmungs-, Interaktions- und Kommunikationsfähigkeit verfügen. Roboterassistenten müssen ihre Umwelt wahrnehmen können, eigenständig Handlungen vollziehen und mit dem Benutzer und der Umwelt interagieren können. Das Greifen und die Manipulation von Objekten gelten hierbei als Schlüsselfunktionen von Roboterassistenten /Hans 2004/.

Klassische 2-Finger-Greifer, wie sie im industriellen Umfeld oft eingesetzt werden, stellen nach Meinung vieler Experten, keine Lösung für hoch entwickelte Serviceroboter dar. Künstliche Hände, wie sie in den vergangenen Jahren vorgeschlagen wurden, bieten eine Reihe von technisch akzeptablen Lösungen, sind aber zu komplex, unhandlich, teuer und unrentabel für den praktischen Einsatz außerhalb des Labors /Lotti 2004, Koganeza 2004, Hesse 2005/.

Um Roboterassistenten am Markt erfolgreich zu platzieren, muss es gelingen, Greifsysteme zu entwickeln, die sowohl dem Wunsch nach Flexibilität bei der Handhabung unterschiedlicher Objektgeometrien als auch wirtschaftlichen Aspekten genügen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, Lösungsansätze und Konzepte für flexible und niedrig komplexe Greifsysteme zu schaffen, die es Roboterassistenten ermöglichen, mit ihrer Umwelt zu interagieren und flexibel auf sich ändernde Handhabungssituationen zu reagieren. Hierzu soll der Finray-Effekt, ein bionisches Prinzip für selbstadaptive Systeme, theoretisch und experimentell untersucht und für den Einsatz als Fingerkinematik in flexiblen Greifsystemen nutzbar gemacht werden. Das Greifsystem soll dabei den Anforderungen bezüglich eines Einsatzes in Roboterassistenten für den Haushaltsbereich genügen. Weiterführendes Ziel ist es ein Verfahren zur Planung optimaler Greifpositionen zu erarbeiten. Neben den theoretischen Grundlagen zur Auslegung einer entsprechenden Fingerkinematik und zur Planung von Griffen soll die technische Machbarkeit anhand von Prototypen nachgewiesen und das Verfahren zur Planung optimaler Greifvorgänge verifiziert werden.

1.3 Vorgehensweise

Um dieses Ziel zu erreichen wird wie folgt vorgegangen:

- Aufbereitung des Standes der Technik und Forschung sowie Erarbeitung von Anforderungen an flexible und niedrig komplexe Greifsysteme für Roboterassistenten im Haushalt
- Konzeption von Teil- und Gesamtsystemen zum flexiblen Greifen
- Entwicklung eines mechanischen Ersatzmodells für den Finray-Effekt zum Einsatz in flexiblen und niedrig komplexen Greifsystemen sowie eines Verfahrens zur Planung von Griffen
- Realisierung von Gesamtsystemvarianten

Die Darstellung des Standes der Technik und Forschung umfasst einen Überblick über die Entwicklungen von Roboterassistenten, industriell eingesetzten Greifsystemen, künstlichen Händen sowie dem in der Zielsetzung erwähnten Finray-Effekt. Anhand dieses Überblickes werden die Defizite des Standes der Technik und die Möglichkeiten zur Entwicklung neuartiger flexibler und niedrig komplexer Greifsysteme diskutiert.

Eine Analyse potenzieller Einsatzszenarien für Roboterassistenten im Haushalt liefert die Anforderungen an flexible Greifsysteme mit Blick auf die zu handhabenden Objekte. Um Greifobjekte mit komplexen Geometrien hinsichtlich ihrer wesentlichen geometrischen Merkmale analysieren zu können, wird eine Methode zur Vermessung dieser Objekte entwickelt. Weitere Anforderungen an flexible Greifsysteme werden anhand einer Analyse der mechanischen und steuerungstechnischen Schnittstellen von Roboterassistenten gewonnen. Das Gesamtsystem „flexibler Greifer“ wird in Teilsysteme gegliedert und die erarbeiteten Anforderungen entsprechend zugeordnet.

Im Folgenden werden Teilsystemvarianten konzipiert und zu ausgewählten Gesamtsystemvarianten kombiniert. Die Gesamtsystemvarianten werden hinsichtlich ihrer Merkmale diskutiert und anhand der zuvor erarbeiteten Anforderungen bewertet.

Für das Fingersystem werden für eine selbstadaptive Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt ein mechanisches Ersatzmodell entwickelt sowie grundlegende Zusammenhänge für n-gliedrige selbstadaptive Fingerkinematiken hergeleitet. Weiterhin wird die Kinematik anhand von Bewegungssimulationen hinsichtlich ihrer Greifmöglichkeiten untersucht.

Zur Planung von Greifvorgängen für flexible Greifsysteme auf Basis einer selbstadaptiven Finger-kinematik nach dem Finray-Effekt wird ein Verfahren entwickelt, welches auf Basis von sensorisch erfassten Objektinformationen optimale Griffpositionen ermittelt. Das Verfahren wird weiter anhand von Versuchsreihen verifiziert.

Abschließend werden zwei Gesamtsystemvarianten flexibler, niedrig komplexer Greifsysteme mit und ohne selbstadaptive Fingerkinematik prototypisch realisiert und in verschiedene Robotersysteme integriert. Die Gesamtsysteme werden in Versuchen hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen zum Greifen unterschiedlicher Objektgeometrien untersucht. Die Versuche liefern wichtige Hinweise zur Umsetzung solcher Greifsysteme und dienen zur Identifikation von Optimierungspotenzialen für künftige Entwicklungen auf diesem Forschungsgebiet.

2 Ausgangssituation

2.1 Begriffe und Definitionen

Serviceroboter

Ein Serviceroboter ist eine frei programmierbare Bewegungseinrichtung, die teil- oder vollautomatisch Dienstleistungen verrichtet. Dienstleistungen sind dabei Tätigkeiten, die nicht der direkten industriellen Erzeugung von Sachgütern, sondern der Verrichtung von Leistungen an Menschen und Einrichtungen dienen /Schraft 1996/.

Roboterassistent

Roboterassistenten können als weitere Evolutionsstufe von Servicerobotern verstanden werden. Sie sind Helfer des Menschen, charakterisiert durch ihre dem Menschen ähnliche Wahrnehmungs-, Interaktions- und Kommunikationsfähigkeit, und agieren in dessen Umgebungen, wie zum Beispiel im Haushalt oder in Fertigungshallen /Hägele 2001, Helms 2002/.

Roboterassistenten im Haushalt sollen ihrem Besitzer lästige Alltagsaufgaben abnehmen. Typische Aufgaben, in Bezug auf flexible Greifsysteme, sind hierbei /Schaeffer 1999/:

- Persönliche Versorgung durch Ausführen einfacher Tätigkeiten, z.B. Bringen von Gegenständen wie Büchern, Fernbedienung, Arznei, etc.
- Gegenseitiges Anreichen von Gegenständen durch Mensch und Maschine
- Reinigen, z.B. von Böden, Waschbecken oder Wänden und Fenster
- Haustechnik-Management (durch die Anbindung an Informationsnetze)

Abbildung 2-1 zeigt die wesentlichen Teilsysteme eines Roboterassistenten in Anlehnung an /Hans 2004/ sowie den in diesem Kontext gelegten Schwerpunkt dieser Arbeit.

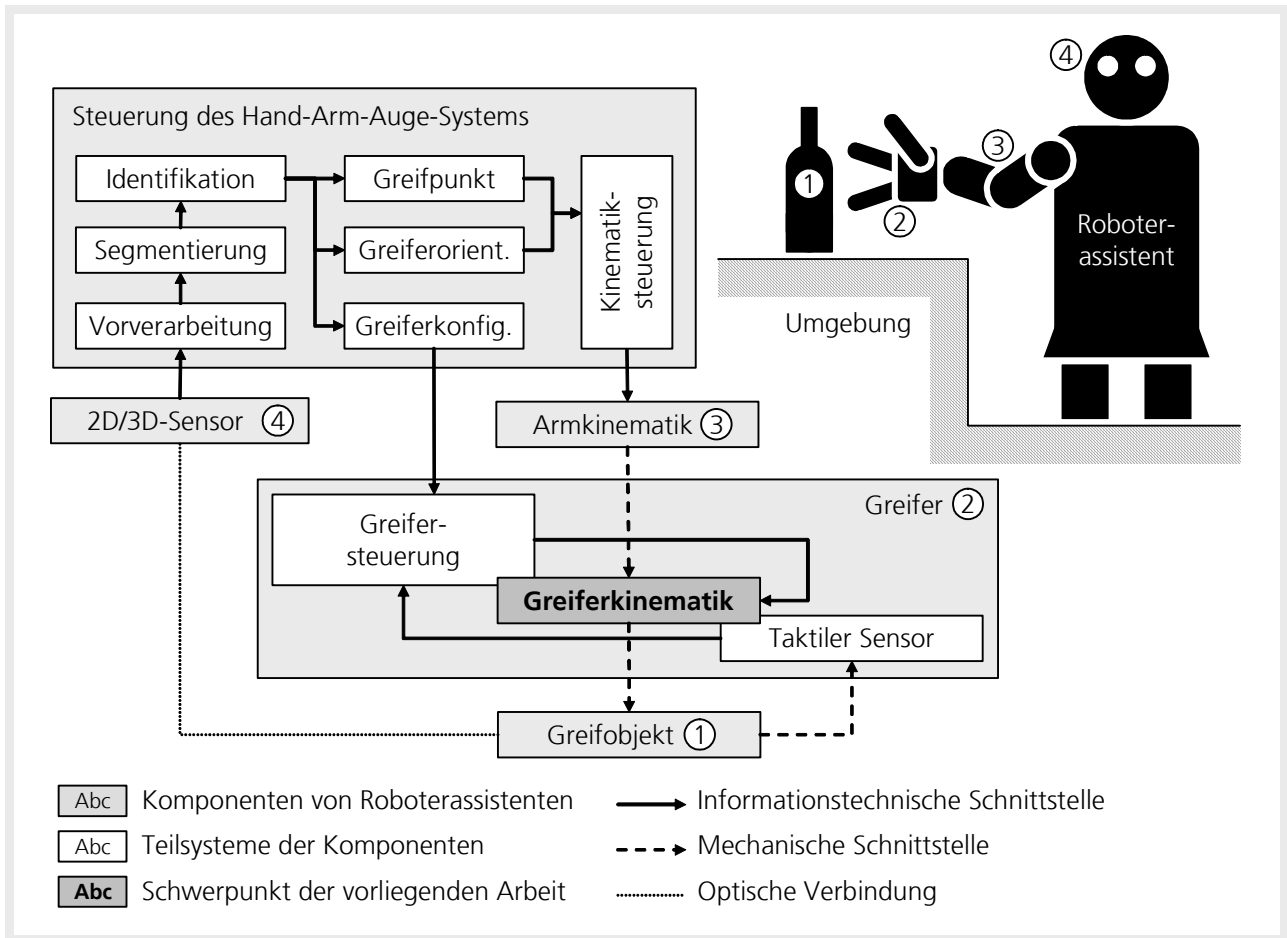


Abbildung 2-1: Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit im Kontext eines Roboterassistenten.

Greifer

Ein Greifer ist ein Teilsystem eines Roboterassistenten, welches eine form- oder kraftschlüssige Verbindung zwischen Roboter und Objekten in seiner Umwelt oder der Umwelt selbst herstellt. Die Verbindung dient dabei zur Bewegung oder Manipulation der Objekte.

Künstliche Hände

Künstliche Hände bestehen aus drei bis fünf Fingern, welche die Greifbewegungen der menschlichen Hand nachahmen. Wesentliches Merkmal ist ein den übrigen Fingern opponierender Daumen. Jeder Finger verfügt über mindestens zwei Glieder und mindestens einen Freiheitsgrad. Der Arbeitsraum künstlicher Hände entspricht in etwa der einer menschlichen Hand.

Finger

Der Finger ist die Komponente eines Greifers oder einer künstlichen Hand, der den Hauptkontakt zwischen Greifer und Greifobjekt herstellt. Über den Finger werden die Greifkräfte in das Greifobjekt eingeleitet. Die Form eines Fingers variiert von einfachen länglichen Ausprägungen bis hin zu auf das Greifobjekt abgestimmten Typen mit zusätzlichen formstabilen Verbindungen zwischen Finger und Objekt. Wie schon oben erwähnt, verfügen Finger künstlicher Hände über zwei bis drei Gelenke, die entweder einzeln angetrieben werden oder durch Zwangsführungen über Getriebe oder Seilzüge miteinander verbunden sind.

Fingerkonfiguration

Fingerkonfiguration bezeichnet die Anordnung und Ausrichtung der Finger einer Hand zueinander. Die Fingerkonfiguration kann durch die Hand selbst geändert werden, um auf unterschiedliche Objektgeometrien zu reagieren.

Manipulation von Objekten

Die Manipulation von Objekten kann auf zwei Arten erfolgen, der internen und der externen Manipulation.

Bei der internen Manipulation wird das Objekt mit den aktiven Fingern einer künstlichen Hand innerhalb des Arbeitsraumes der Hand manipuliert, d.h. die Orientierung des Objektes bezogen auf die Orientierung der Hand wird durch die Hand selbst geändert.

Bei der externen Manipulation von Objekten wird das Objekt mit den Bewegungen einer Armkinematik manipuliert. Der Greifer oder die Hand dient hierbei als Schnittstelle zwischen Kinematik und Greifobjekt.

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Roboterassistenten im Haushalt

Neben Forschungsdemonstratoren /Schraft 2004, Hans 2004/ existieren, vorwiegend in Japan, erste Prototypen von kommerziell erhältlichen Roboterassistenten /Mitsubishi 2005,

Hitachi 2005, Fujitsu 2005, Honda 2005/. Sie unterscheiden sich durch den Grad an kognitiven Fähigkeiten wie dem Erkennen von Personen, selbstständiger Lokalisierung und Navigation sowie der Manipulationsfähigkeit von Objekten.



Abbildung 2-2: Beispiele von Roboterassistenten für den Haushaltsbereich

Die Greiforgane von Roboterassistenten bestehen meist aus einfachen 2-Finger-Greifern zur Aufnahme einfacher Objekte oder aus ästhetischen Gründen aus fünffingrigen Händen, um das Gesamtsysteme menschenähnlicher wirken zu lassen oder um Gesten wie z.B. Winken oder Ratlosigkeit darzustellen. Eine geschickte Manipulation, d.h. die Bewegung oder Positionierung des Objektes innerhalb der Hand, ist mit ihnen nicht möglich.

2.2.2 Industrielle Greifer

Mechanische Greifer und Greifer nach dem Saugprinzip sind die industriell am häufigsten eingesetzten Wirkformen /Wolf 2004/. Abbildung 2-3 zeigt Beispiele typischer industrieller Greifsysteme. Mechanische Greifer erzeugen, je nach Gestaltung der Greiferbacken, punktuell wirkende Greifkräfte, alle anderen Greifer fixieren das Greifobjekt durch Kraftfelder /Hesse 2005/. Wirkprinzipien wie Magnetgreifer oder Adhäsionsgreifer spielen für das Gros der Anwendungen nur eine untergeordnete Rolle /Wolf 2004/.



Abbildung 2-3: Beispiele von mechanischen Greifern /Schunk 2005/ und Sauggreifern /Schmalz 2005/.

Zur Auswahl eines Greifers müssen vier grundlegende Einflussfaktoren berücksichtigt werden /Hesse 2005/:

- Technologische Einflüsse (Greifzeit, Greifweg, Greifkraftverlauf, Anzahl der Greifobjekte je Griff),
- Einflüsse der Greifobjekte (Objektgröße, Objektform, Masse, Material, Position),
- Einflüsse der Handhabungseinrichtung (Genauigkeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung, Schnittstellen) und
- Umwelteinflüsse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Kräfte, Schmutz).

Zur Auswahl und Gestaltung von Greifsystemen existieren nach dem Stand der Technik, Leitsätze, Auswahlkriterien und Vorgehensweisen /Seegräber 1993, Wolf 2004, Hesse 2005/. Abbildung 2-4 zeigt eine Klassifizierung industrieller Greifer nach ihren Wirkprinzipien in Anlehnung an /Hesse 2005/.

Wirkprinzip	Mechanisch	Pneumatisch	Pneumostatisch /-dynamisch	Elektrisch	Adhäsiv
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> • Zangengreifer • Klemmgreifer • Gelenkfingergreifer • Umfassungsgreifer • Aufwältzgreifer • Verhakende Greifer 	<ul style="list-style-type: none"> • Überdruckgreifer (Loch-, Zapfen-, Schrumpfring-, Luftstrahl-, Membrangreifer, Beugefinger) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterdruckgreifer (Vakuumsauger, Flächensauggreifer, Haftsauger, Bernoulli-Greifer) 	<ul style="list-style-type: none"> • Magnetgreifer (Permanent-, Elektromagnet-, Permanent-Elektromagnetgreifer) • Elektrostatische Greifer 	<ul style="list-style-type: none"> • Kapillargreifer • Gefriergreifer • Klebstoffgreifer
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft- und Formschluss möglich • Großes Hub- und Greifkraftspektrum • Pneumatisch, hydraulisch und elektrisch angetrieben 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft- und Formschluss möglich • Besonders für empfindliche oder poröse Oberflächen geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • Reiner Kraftschluss • Viele Bauformen erhältlich • Großes Greifkraftspektrum (gilt nicht für Bernoulli-Greifer) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reiner Kraftschluss • Magnet-G.: Nur für ferromagnet. Materialien • Elektrost.-G.: Nur kleine Greifkräfte möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Reiner Kraftschluss • Einsatzbereiche: Textilien, leichte und poröse Materialien, Flüssigkeiten
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> • /Schunk 2005/ • /IPR 2005/ • /Sommer 2005/ 	<ul style="list-style-type: none"> • /Festo 2005/ • /Fipa 2005/ • /Sommer 2005/ 	<ul style="list-style-type: none"> • /Schmalz 2005/ • /Festo 2005/ • /Fipa 2005/ 	<ul style="list-style-type: none"> • /Dematic 2005/ • /Goudsmit 2005/ 	<ul style="list-style-type: none"> • /Naiss 2005/ • /Aftag 2005/

Abbildung 2-4: Klassifizierung industrieller Greifer nach ihren Wirkprinzipien einschließlich ihrer Charakteristika in Anlehnung an /Hesse 2005/.

Die mechanischen Zangengreifer lassen sich weiter in 2-Finger-Parallel-Greifer, 2-Finger-Winkel-Greifer und 3-Finger-Zentrisch-Greifer aufteilen /Schunk 2005, IPR 2005, Sommer 2005/. Mit diesen Greifertypen lässt sich bereits ein großes Objektspektrum abdecken /Wegener 2003, Wolf 2004/.

Flexibilität industrieller Greifer

Ein Greifer ist dann flexibel, wenn er für mehr als eine Handhabungsaufgabe geeignet ist, d.h. selbstanpassungsfähig hinsichtlich der Formen der entsprechenden Greifobjekte ist /Hesse 2005/. Um diese Flexibilität zu erlangen, werden verschiedene Konzepte verfolgt /Seegräber 1993, Wolf 2004, Hesse 2005/:

- Wechselsysteme, d.h. ein manueller oder automatischer Wechsel der Greifbacken oder des gesamten Greifsystems. Nachteilig ist hierbei der benötigte Platzbedarf zur

Aufbewahrung der Wechselgreifer sowie die zum Wechsel benötigte Zeit, die sich negativ auf den Anlagentakt auswirkt.

- Mehrfachgreifer, d.h. ein Greifsystem mit unterschiedlichen Greifern an unterschiedlichen Positionen. Die Positionen können dabei von der Handhabungseinrichtung angefahren werden oder durch den Mehrfachgreifer selbst, z.B. durch einen zusätzlichen Aktor (Revolvergreifer). Nachteilig ist das meist große Gewicht dieser Greifsysteme.
- Mehrstellengreifer, d.h. ein Greifsystem mit Greifbacken, bei denen an unterschiedlichen Stellen unterschiedliche Objektformen aufgenommen werden können. Nachteilig ist, dass pro zusätzliches Objekt die Größe der Greifbacken steigt.

Flexibilität bzgl. sich ändernder Objektgrößen erlangt man durch Greifer mit großen Hüben, bei denen die Greifposition frei programmierbar ist oder prismatischen Greiferbacken, die bei verschiedenen Objektgrößen unterschiedliche Kontaktstellen aufweisen.

2.2.3 Künstliche Hände

Die Aufgaben künstlicher Hände sind neben dem eigentlichen Greifen und Sichern von Objekten auch die interne Manipulation des Objektes, d.h. die Änderung von Position und Orientierung innerhalb des Greifraumes der Hand.

Salisbury /Salisbury 1985/ zeigte, dass Hände für interne Manipulationsaufgaben mindestens über drei Finger mit je drei Freiheitsgraden verfügen müssen. Im Bereich der künstlichen Hände sind Fingerzahlen zwischen drei und fünf vorzufinden.

Modulare Bauweise

Prinzipiell existieren zwei grundlegende Bauarten: Die integrierte und die modulare Bauweise. Bei der modularen Bauweise sind alle für die Fingerbewegungen benötigten Aktoren in der Hand und in den Fingern untergebracht. Somit ist eine Kopplung der Hand an beliebige Manipulatoren oder Handhabungskinematiken möglich.

Ein weiteres Merkmal ist, dass diese Hände aufgrund der Baugröße der Komponenten meist deutlich größer als die menschliche Hand sind /Lotti 2002/. Abbildung 2-5 zeigt künstliche Hände in modularer Bauweise.



Abbildung 2-5: Beispiele für künstliche Hände in modularer Bauweise.

Integrierte Bauweise

Bei der integrierten Bauweise werden die Aktoren in einer der Hand zugehörigen Armkinematik integriert, d.h. aus dem Gehäuse der Hand ausgelagert. Die Kraftübertragung geschieht dabei meist mit Seilzügen, Gestängen oder pneumatisch mittels Schläuchen. Solche Hände haben oft in Größe und Form große Ähnlichkeit mit der menschlichen Hand. Der Betrieb der Hand kann allerdings nur in Verbindung mit einer entsprechenden Armkinematik erfolgen. Abbildung 2-6 zeigt Beispiele von künstlichen Händen in integrierter Bauweise.



Abbildung 2-6: Beispiele für künstliche Hände in integrierter Bauweise.

Unteraktuierte Hände

Um die Komplexität von künstlichen Händen, in modularer und in integrierter Bauweise, zu reduzieren, sind im Bereich der Forschung so genannte unteraktuierte Hände (engl.: „Underactuated Hands“) zu finden. Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien wird bei diesen Händen über selbstadaptive Fingerkinematiken, die mittels Gestängen oder Seilzügen von Aktoren angesteuert werden, erreicht. Die Zahl der

Freiheitsgrade des Fingers ist dabei größer als die Anzahl der benötigten Aktoren. Die Bewegungen zwischen den Fingergliedern erfolgen zwangsgeführt. Die Finger können sich aber mittels elastischer Koppellemente, z.B. Federn, adaptiv, d.h. kraftgesteuert an variierende Objektgeometrien anschmiegen. Abbildung 2-7 zeigt Forschungsarbeiten zu diesem Teilgebiet künstlicher Hände.

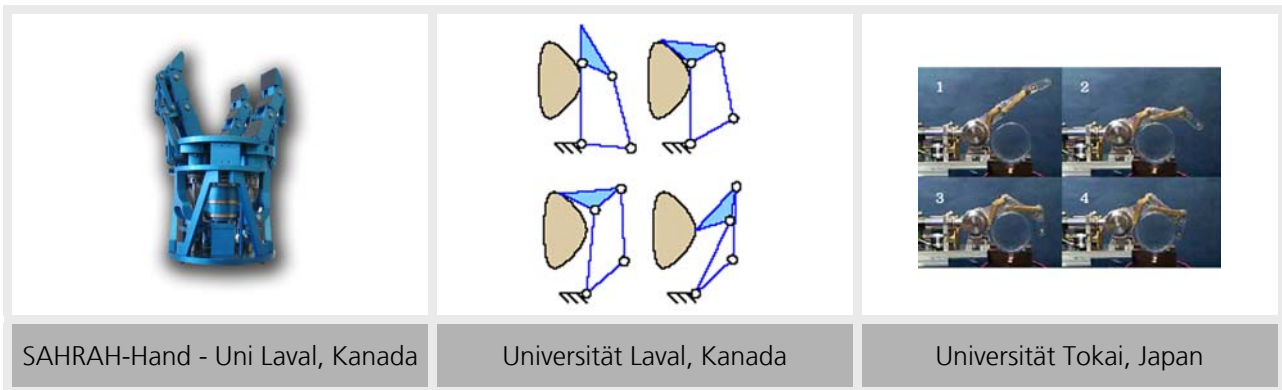


Abbildung 2-7: Unteraktuierte Hände und Forschungsarbeiten zu selbstadaptiven, unteraktuierten Fingerkinematiken.

Weitere Forschungsarbeiten sind z.B. in /Birglen 2004, Martin 2004, Koganezawa 2004/ zu finden.

Kriterien zur Bewertung künstlicher Hände

Zur Bewertung der Flexibilität und der Komplexität von künstlichen Händen schlägt /Lotti 2002/ einen anthropomorphen Index i_{Ant} vor. Der Index soll die Ähnlichkeit zur menschlichen Hand repräsentieren. Zur Ermittlung des Indexes werden drei Aspekte von flexiblen Greifsystemen betrachtet:

- Der Aufbau des Greifsystems, d.h. im Besonderen die Anzahl der Finger und das Vorhandensein einer Handfläche. Mit jedem Finger mehr steigt die Geschicklichkeit des Greifsystems, aber auch aufgrund der höheren Komponenten-zahl die Komplexität sowohl aus mechanischer als auch aus steuerungstechnischer Sicht. Bezogen auf die nachfolgenden Aspekte wird dem Aufbau des Greifsystems die größte Bedeutung zugesprochen, was sich in einer entsprechenden Gewichtung w_1 dieses Aspektes widerspiegelt.
- Die Kontaktflächen zwischen Greifsystem und Greifobjekt, d.h. die Größe der Kontaktfläche und die Beschaffenheit der Kontaktfläche. Die Kontaktfläche gibt in entscheidendem Maß an wie sicher ein Griff ist. Dies geschieht zum einen durch den Reibkoeffizienten zwischen Kontaktmaterial und Greifobjekt und zum anderen durch

die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Greifsystem und Greifobjekt, was sich in einer höheren Kontaktfläche niederschlägt.

- Die Größe des Greifsystems, d.h. das Fassungsvermögen des Greifsystems bezogen auf die Greifobjekte. Dieser Aspekt deckt weiterhin das Verhältnis zwischen den einzelnen Gliedmaßen im Vergleich zur menschlichen Hand mit ab.

Abbildung 2-8 zeigt das Berechnungsschema, die Kriterien mit ihren Gewichtungen und dem möglichen Erfüllungsgrad. Der Erfüllungsgrad jedes einzelnen Kriteriums kann für den Aspekt der Kinematik die Werte 0 und 1, d.h. erfüllt oder nicht erfüllt annehmen. Die anderen Kriterien werden zwischen 0 und 1 angegeben. Alle Kriterien werden so gewichtet und gemittelt, dass der anthropomorphe Index auch Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. 1 steht dabei für den höchsten Grad an Geschicklichkeit und Komplexität.

Bewerteter Aspekt	i	Kriterium	Erfüllungsgrad κ
Aufbau ($w_1 = 0,6$)	1	Zeige- und Mittelfinger vorhanden (0,3)	0/1 0/0,3
	2	Opponierender Daumen vorhanden (0,3)	0/1 0/0,3
	3	Handfläche vorhanden (0,2)	0/1 0/0,2
	4	Ringfinger vorhanden (0,1)	0/1 0/0,1
	5	Kleiner Finger vorhanden (0,1)	0/1 0/0,1
$v_1 = \sum_{i=1}^5 \kappa_i$			0...1
Kontaktfläche ($w_2 = 0,2$)	6	Ausdehnung der Kontaktfläche	0...1
	7	Geschmeidigkeit der Kontaktfläche	0...1
	8	Rutschfestigkeit der Kontaktfläche	0...1
$v_2 = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=6}^8 \kappa_i$			0...1
Größe ($w_3 = 0,2$)	9	Gesamtgröße	0...1
	10	Verhältnis zwischen den Gliedern	0...1
$v_3 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=9}^{10} \kappa_i$			0...1
$i_{Ant} = \sum v_i \cdot w_i$			0...1

Abbildung 2-8: Berechnungsschema des anthropomorphen Index nach /Lotti 2002/.

Forschungsarbeiten zu künstlichen Händen sind in /Salisbury 1983, Jacobsen 1986, Butterfaß 1999, Townsend 2000, Wegener 2000, Lotti 2002, Hirzinger 2002, Schulze 2004, Schraft 2004, Wegener 2004, Namiki 2004, Shadow 2004, Suárez 2004, Hesse 2005/ beschrieben. Abbildung 2-9 gibt einem Überblick über diese Forschungsarbeiten anhand realisierter künstlicher Hände mit ihren wichtigsten Leistungsdaten und der Angabe des anthropomorphen Index nach /Lotti 2002/.

	Utah/MIT-Hand	Stanford/JPL-Hand	Barrett-Hand	DLR-Hand I	Robonaut Hand	DLR-Hand II	Shadow-Hand	FZK-Hand	UB-Hand 3	GIFU-Hand
Bauweise	IB	MB	MB	MB	IB	MB	IB	IB	IB	MB
Anzahl der Finger	4	3	3	4	5	4	5	5	5	5
Anzahl der Gelenke	16	9	8	16	22	18	k.A.	18	k.A.	20
Gesteuerte DOF	16	9	4	12	14	13	k.A.	13	k.A.	16
Kontaktflächen	FS FG HF	FS	FS FG HF	FS FG HF	FS FG	FS FG HF	FS FG HF	FS FG HF	FS FG HF	FS FG HF
Antrieb	PA	EA	EA	EA	EA	EA	PA	PA	k.A.	EA
Kraftübertragung	S	S/G	S/G	S/G	k.A.	G	S	D	k.A.	G
Geschicklichkeit	L ₄	L ₃	L ₂	L ₄	L ₄	L ₄	k.A.	L ₂	k.A.	L ₄
Anthropomorpher Index	0,84	0,48	0,48	0,69	0,99	0,78	k.A.	0,88	k.A.	0,98
Legende:	k.A.: keine Angaben									
Bauweise	Kontaktflächen	Antrieb	Kraftübertragung			Geschicklichkeit				
MB: Modulare	FS: Fingerspitze	EA: Elektrisch	S: Seilzug	L ₁ : niedrig	L ₂ : mittel					
IB: Integrierte	FG: Fingerglieder	PA: Pneumatisch	G: Getriebe	L ₃ : hoch	L ₄ : sehr hoch					
	HF: Handfläche		D: Direktantrieb							

Abbildung 2-9: Künstliche Hände und ihre technischen Daten.

Die meisten der dargestellten künstlichen Hände sind Forschungsdemonstratoren. Die Shadow-Hand und die Gifu-Hand sind mittlerweile kommerziell erhältlich, zielen aber auf universitäre Einrichtungen und Forschungsinstitute zur Erforschung der Steuerung und Greifplanung komplexer künstlicher Hände /Shadow 2005, Gifu 2004/. Einzig die Barrett-Hand zielt auf industrielle Applikationen /Townsend 2000/.

Steuerung und Greifplanung künstlicher Hände

Prinzipiell existieren zwei Methoden zur Steuerung von künstlichen Händen: Zum einen die direkte Steuerung über Datenhandschuh oder andere Eingabegeräte mit der gleichen Anzahl an Freiheitsgraden wie die zu steuernde Hand und zum anderen eine rechnergestützte, autonome Greifplanung auf Basis von Sensordaten, CAD-Daten oder einer Kombination von Sensor- und CAD-Daten /Butterfaß 1999/.

Bei der Steuerung mittels Datenhandschuh, der die gleiche kinematische Struktur wie die zu steuernde Hand und die gleiche Zahl von Freiheitsgraden hat, werden die Gelenkwinkel der Handschuhglieder als Stellgröße auf das entsprechende Gelenk der künstlichen Hand übertragen. Dabei können Verstärkungsfaktoren für Weg- und Geschwindigkeitswerte vorgegeben werden. Um dem Bediener eine Rückmeldung über das gegriffene Objekt zu vermitteln, können Force-Feedback-Systeme (FFS) eingesetzt werden. Dabei werden Kraftsensoren in die künstliche Hand integriert, mit denen Aktorsysteme am Datenhandschuh angesteuert werden, um dem Bediener ein Feedback über den Greifzustand und die dort wirkenden Greifkräfte zu vermitteln. Datenhandschuhe, mit und ohne Force-Feedback, werden für Telemanipulationen eingesetzt. Die Steuerung der künstlichen Hand kommt ohne aufwändige Algorithmen aus, verfügt aber auch über keine Autonomie im Sinne einer selbstständigen Manipulation von Objekten.

Ziel der autonomen Greifplanung ist es, auf Basis von Objektinformationen Trajektorien für die einzelnen Gelenke der künstlichen Hand zu berechnen, die zu einem sicheren Griff führen. Hierzu muss neben der optimalen Endkonfiguration, deren Suche je nach Komplexität des Objektes bereits sehr aufwändig ist, auch noch die inverse Kinematik des Fingers berechnet werden. Soll darüber hinaus das Objekt noch innerhalb der Hand, z.B. zwischen drei Fingerspitzen gedreht werden, entsteht weiterer, erheblicher Rechenaufwand /Miller 2001, Wöhlke 1991/.

2.2.4 Greifmöglichkeiten der menschlichen Hand

Die aus der medizinischen Literatur bekannte Klassifizierung der Greifmöglichkeiten der menschlichen Hand von /Napier 1956/ beschreibt die fundamentalen Unterschiede zwischen Kraft- und Präzisionsgriffen. Bei den Kraftgriffen umschlingen die Finger dabei das Greifobjekt und bieten ein hohes Maß an Stabilität wobei Präzisionsgriffe primär die Greifkräfte über die Fingerspitzen in das Objekt einleiten und ein hohes Maß an Manipulierbarkeit bieten.

Eine Erweiterung dieser Klassifizierung um Griffe aus dem Bereich der Fertigung schlagen Cutkosky und Wrigth vor /Cutkosky 1986/. In ihrer baumartigen Klassifizierung wird der Kraftgriff weiter in umklammernd und nicht umklammernd unterteilt. Die umklammernden Griffe werden wiederum in prismatische, zirkulare und laterale Griffe unterschieden. Die Klasse der Präzisionsgriffe wird ebenfalls in prismatische und zirkulare Griffe unterteilt. Aus dieser Klassifizierung ergeben sich fünf Hauptklassen von Griffen und Fingerkonfigurationen. Ausgewählte Vertreter dieser Klassen sind in Abbildung 2-10 dargestellt.



Abbildung 2-10: Ausgewählte Griffmöglichkeiten der menschlichen Hand.

2.2.5 Der Finray-Effekt

Dieser bionische Effekt wurde bei Fischgräten entdeckt. Bei einer Beaufschlagung mit einer Kraft im Mittelteil der Gräte bewegt sich die Spitze der Gräte entgegen der Richtung der einwirkenden Kraft und nicht, wie z.B. bei einem balkenförmigen Elastomer, in die gleiche Richtung. Das Patent /Kniese 2002/ beschreibt ein „Im Querschnitt doppelt konkaves Bauteil zur ein und/oder beidseitigen dynamischen Kraftaufnahme, das durch Streben und eine Außenhaut ein Gerüst bildet. Die Streben sind lotrecht mit der auf Druck flexibel

reagierenden Außenhaut über ein flexibles Befestigungsmittel mit dieser in Wirkverbindung bringbar. Eine auf die Außenhaut wirkende Kraft wird auf die Streben übertragen, wobei das obere Ende und das untere Ende der Streben immer eine entgegengesetzte Bewegung um deren Hochachse ausführen“.

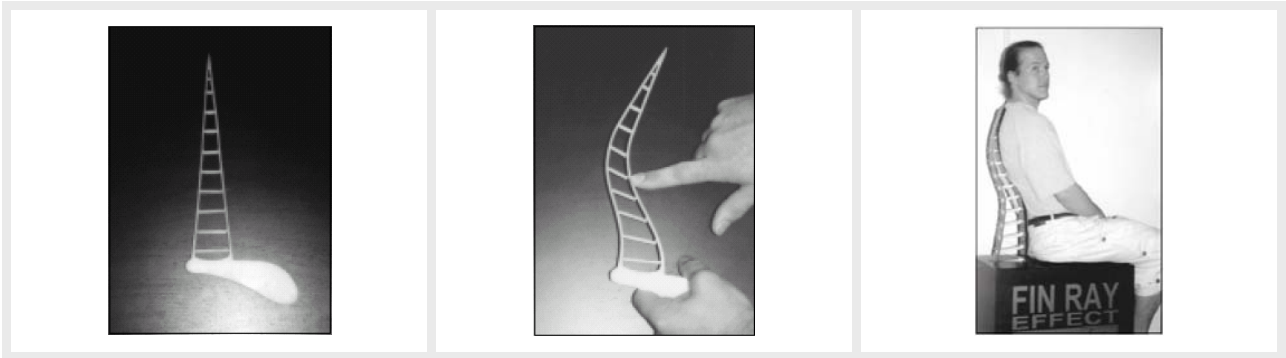


Abbildung 2-11: Der Finray-Effekt.

Einsatzgebiete für den Finray-Effekt liegen im Bereich von Stuhlrückenlehnen und Sitzen, Tragehilfen oder Rucksackpolstern sowie Zangen oder Greifsystemen. Bislang existieren Funktionsmuster des Effektes (Abbildung 2-11). Wissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich des Einsatzes in der Greiftechnik existieren nach dem Stand der Technik nicht.

2.3 Folgerungen aus dem Stand der Technik

Bisherige Roboterassistenten verfügen hinsichtlich der geforderten Flexibilität gegenüber sich ändernden Greifobjekten nur über unzureichend ausgeprägte Greifwerkzeuge, die sich meist auf einfache 2-Finger-Greifer beschränken oder rein aus optischen Gründen Hände angedeutet haben.

Standardgreifer besitzen aufgrund der kleinen Zahl an Freiheitsgraden (meist nur einen) keine ausreichende Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien. Künstliche Hände sind aufgrund ihrer hohen Zahl an Freiheitsgraden (zwischen 9 und 22) sehr komplex, was zu einer hohen Zahl an Komponenten führt. Diese Vielzahl an Komponenten, und die damit verbundenen, signifikanten Mehrkosten gegenüber industriellen Greifern, resultiert darin, dass künstliche Hände nach dem Stand der Technik für Anwendungen im Haushaltsbereich derzeit nicht wirtschaftlich einsetzbar sind.

Weiteres Hemmnis für den Einsatz künstlicher Hände ist die aufwändige Planung des Greifvorganges für bekannte und in größerem Maße für unbekannte Objekte, wie sie beim Einsatz von Roboterassistenten im Haushaltsbereich vorkämen.

Der Finray-Effekt, eine Kinematik, die sich ohne zusätzliche Aktorik an frei geformte Objekte anschmiegt, stellt für flexible, niedrig komplexe Greifsysteme einen sehr guten Ansatz dar. Allerdings existieren nach dem Stand der Technik weder Erkenntnisse bzgl. des Einsatzes in flexiblen Greifsystemen noch Nachweise über die Machbarkeit solcher Systeme oder die grundlegenden theoretischen Zusammenhänge in Bezug auf das Greifen geometrievarianter Objekte.

Aus dem Stand der Technik wird deutlich, dass noch keine wirtschaftlich einsetzbaren Greifer existieren, die unbekannte, geometrievariante Objekte handhaben können. Die Entwicklung eines flexiblen Greifsystems, unter Verwendung selbstadaptiver Fingerkinematiken auf Basis des Finray-Effektes, zum Greifen geometrievarianter und unbekannter Objekte ist daher naheliegend.

3 Analyse typischer Handhabungsaufgaben für Roboterassistenten im Haushalt und Ableitung von Anforderungen an ein Greifsystem zum Greifen geometrievarianter und unbekannter Objekte

3.1 Methode zur Analyse von Greifobjekten

Um eine Klasse geometrievarianter Greifobjekte hinsichtlich den Anforderungen an flexible Greifsysteme zu untersuchen, muss eine geeignete Methode entwickelt werden, mit der die Objekte parametrisiert werden können.

Im Bereich des Reverse Engineering werden Best-Fit-Algorithmen entwickelt, mit denen in eine Menge diskreter Objektpunkte Regelgeometrien wie Quader, Zylinder oder Flächen eingepasst werden können /Ahn 2004a, Ahn 2004b/. Diese Algorithmen verfügen jedoch nicht über die Leistungsfähigkeit, um Freiformflächen durch Regelgeometrien zu approximieren.

Aus dem Forschungsgebiet der graphischen Datenverarbeitung sind Methoden bekannt, Objekte z.B. für CAD-Systeme aus Regelgeometrien zusammensetzen. CSG (Constructive Solid Geometry) ist eine solche Methode. Sie stellt Datenstrukturen für Quader, Zylinder, Kugeln und Kegel zur Verfügung /Roth-Koch 2004/.

Die Approximation von Regelgeometrien an reale Greifobjekte bietet den Vorteil, die Komplexität der jeweiligen Objektgeometrie auf einfache Grundformen zu reduzieren. Methoden, um Regelgeometrien an reale Objekte zu approximieren, existieren nicht.

3.1.1 Segmentierung realer Greifobjekte

Repräsentiert man die Kontur eines Greifobjektes durch eine Funktion $y = f(x)$ kann das Objekt an Stellen, an denen die Funktion nicht differenzierbar ist, d.h. an den Stellen, an denen keine eindeutig bestimmte Tangente besteht, aufgetrennt werden. Am Beispiel eines Weinglases in Abbildung 3-1 soll diese Auftrennung verdeutlicht werden.

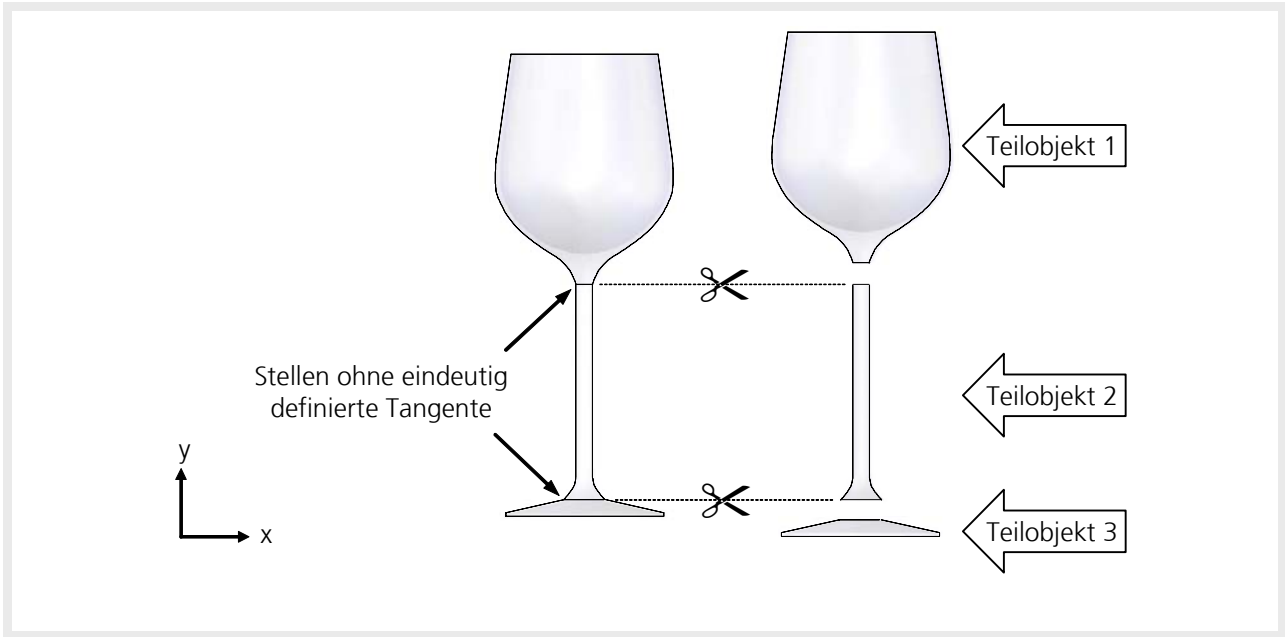


Abbildung 3-1: Auftrennung eines Objektes an den Stellen, an denen die Funktion, die die Kontur beschreibt, nicht differenzierbar ist.

Objekte, die an jeder Stelle der Funktion $y = f(x)$ differenzierbar sind, werden an den Übergangstellen zwischen $x = \text{konst.}$ und $x \neq \text{konst.}$ aufgetrennt. Diese Methode der Segmentierung wird am Beispiel der Weinflasche in Abbildung 3-2 verdeutlicht.

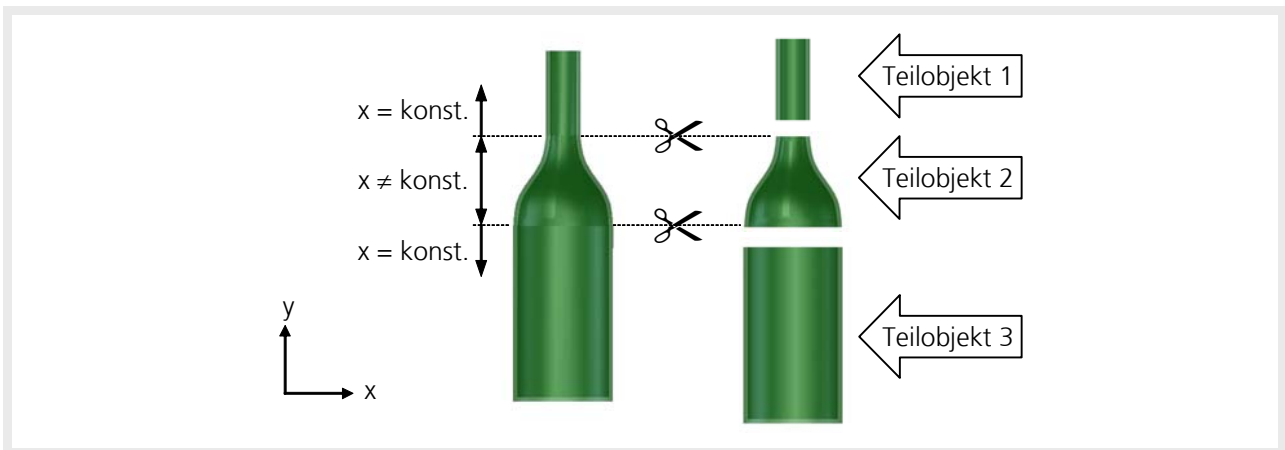


Abbildung 3-2: Auftrennung eines Objektes an den Stellen zwischen $x = \text{konst.}$ und $x \neq \text{konst.}$

3.1.2 Approximation von Regelgeometrien an die segmentierten Greifobjekte

In die Segmente der Teilobjekte werden die Regelgeometrien so eingepasst, dass das Volumen der Realgeometrie und das der Regelgeometrie gleich sind. Die Objektlänge bleibt konstant. So erhält man einen approximierten Objektdurchmesser, der die reale Form besser beschreibt als der Mittelwert zwischen minimalem und maximalem Durchmesser, da

er die Volumenverteilung des Körpers mit berücksichtigt. Abbildung 3-3 zeigt das Ergebnis der Approximation von Zylindern an die segmentierten Teilobjekte des Weinglases und der Weinflasche aus Kapitel 3.1.1.



Abbildung 3-3: Approximation von Regelgeometrien an ein segmentiertes Weinglas und das Teilobjekt 2 der Weinflasche.

Das Bild zeigt die Schnittmenge zwischen realem und approximiertem Objekt. Hellgrau symbolisiert den Bereich, in dem Material dem realen Teil hinzugefügt wurde, dunkelgrau den Bereich, an dem Material entfernt wurde.

Mit dieser Methode ist es nun möglich, komplexe Geometrien in regelgeometrische Körper zu zerlegen und zu beschreiben. Mit Hilfe dieser Methode sollen im Folgenden Szenarien analysiert werden, um Anforderungen an die Greiftechnik im Hinblick auf Größe und Formen der Objekte ableiten zu können.

3.2 Analyse der Handhabungsaufgabe beim Servieren von Getränken

Das Servieren von Getränken ist dadurch gekennzeichnet, dass von einer ebenen Fläche (Tresen, Tisch, Anrichte, etc.) senkrecht stehende Gefäße (Flaschen, Gläser, Tassen, etc.) gegriffen und zu einer weiteren ebenen Fläche oder dem Bedienten selbst transportiert werden.

Die Greifrichtung ist je nach Verhältnis zwischen der Höhe der ebenen Fläche und der Größe des Roboterassistenten orthogonal zur Hochachse des Gefäßes oder zentrisch in Richtung der Hochachse.

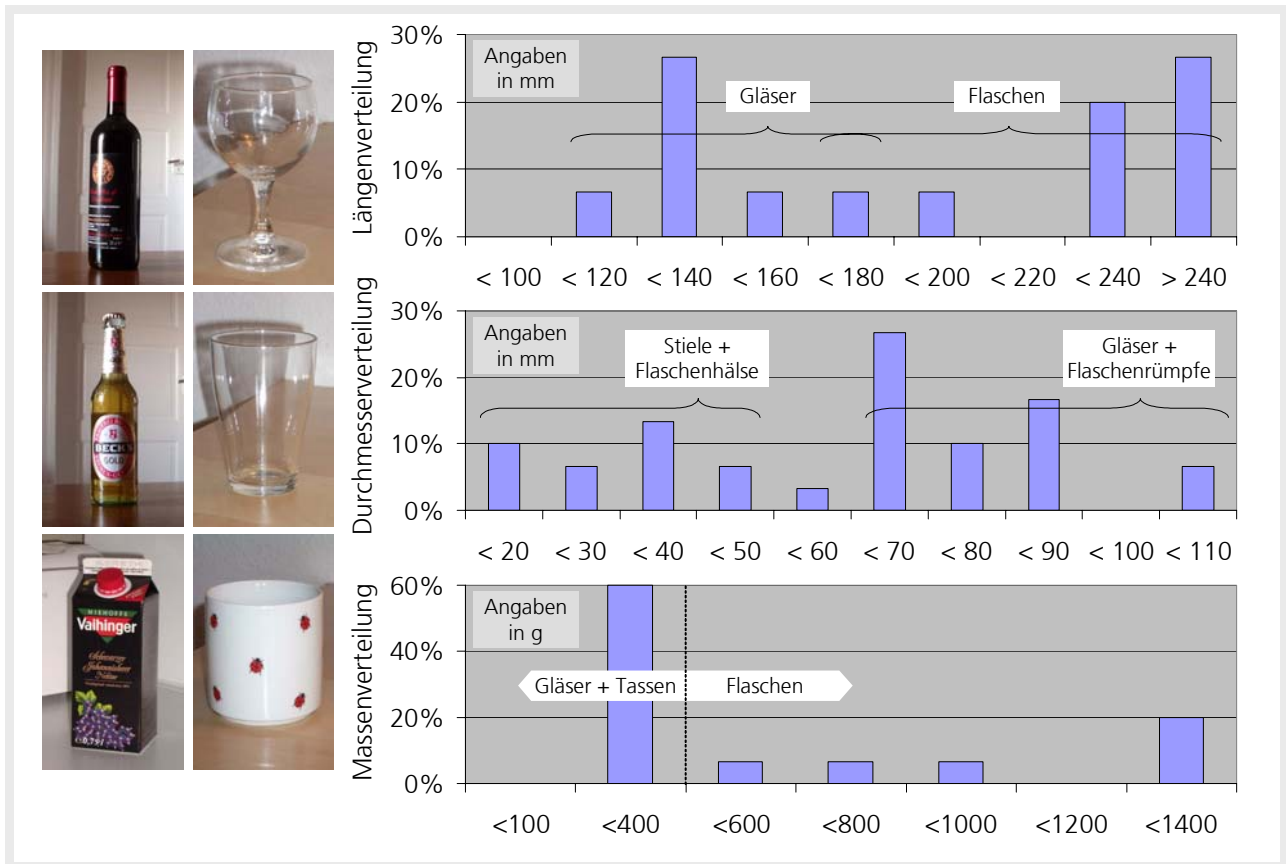


Abbildung 3-4: Typische Objekte beim Servieren von Getränken, inkl. Längen-, Durchmesser-, und Massenverteilung.

Die in Abbildung 3-4 dargestellten Diagramme zeigen die prozentuale Längen-, Durchmesser- und Massenverteilung von unterschiedlichen Tassen, Bechern, Gläsern und Flaschen, die nach der oben beschriebenen Methode an regelgeometrische Körper approximiert wurden.

Die Längenverteilung entspricht dabei der Höhe der Objekte. Sie liegt in einem Bereich zwischen 100 mm und 260 mm. Die Durchmesser der Objekte variieren zwischen 20 mm und 120 mm. Das Gros der Objekte (mehr als 60 %) wiegt weniger als 400 g.

Typischerweise werden derartige Objekte vom Menschen im prismatischen Kraftgriff oder von oben im zirkularen Präzisionsgriff gegriffen (vgl. Kapitel 2.2.4). Hieraus lassen sich die folgenden Anforderungen ableiten.

A1: Der Greifer muss einen 3-Finger-Parallel-Griff beherrschen, um stehende zylindrische oder quaderförmige Objekte mit einer Höhe von mindestens 100 mm orthogonal zur Hochachse des Greifobjektes greifen zu können.

A2: Der Greifer muss einen 3-Finger-Zentrisch-Griff beherrschen, um stehende zylindrische oder kugelförmige Objekte mit einem Durchmesser von mindestens 60 mm in Richtung der Hochachse greifen zu können.

Typische Füllmengen von Flaschen, z.B. Weinflaschen sind zwischen 0,5 l und 1 l. Je nach Material und Wandstärke des Gefäßes kommen Massen bis zu 1,3 kg zustande. Je nach Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Greifer und Greifobjekt, der gesamten Greifkraft und der Materialpaarung zwischen Greifer und Greifobjekte kommt ein sicherer Griff zustande. Dabei lassen sich eine ungünstige Materialpaarung sowie eine geringe maximale Greifkraft über eine hohe Anzahl an Kontaktpunkten kompensieren:

A3: Der Greifer sollte über möglichst viele Kontaktpunkte zwischen Greifer und Greifobjekt verfügen, um einen sicheren Griff zu gewährleisten.

Aus den Umgebungsbedingungen beim Servieren von Getränken entstehen keine weiteren Anforderungen an das Greifsystem.

3.3 Analyse der Handhabungsaufgabe beim Ausräumen einer Spülmaschine

Das Ausräumen der Spülmaschine ist dadurch gekennzeichnet, dass in zwei Ebenen Objekte von oben gegriffen und auf einer ebenen, höher angeordneten Fläche abgelegt werden. Tassen und Gläser sind dabei so angeordnet, dass sie zentrisch an ihrem Boden oder an Henkeln gegriffen werden. Teller sind so angeordnet, dass sie von oben am Tellerrand gegriffen werden und etwa um 90° gedreht abgelegt werden.

Abbildung 3-5 zeigt eine gefüllte Spülmaschine nach dem Spülgang mit der Längen-, Durchmesser- und Massenverteilung der analysierten Objekte.

Die Anforderungen A1 und A2 decken Tassen und Gläser weitgehend ab. Teller können als flache, zylindrische Objekte angesehen werden, die in der Spülmaschine auf der Mantelfläche des Zylinders abgestellt sind, so dass sich folgende Anforderung formulieren lässt:

A4: Der Greifer muss einen 3-Finger-Parallel-Griff beherrschen, um flache zylindrische oder quaderförmige Objekte mit einer Höhe von mindestens 10 mm orthogonal zur Hochachse des Greifobjektes greifen zu können.

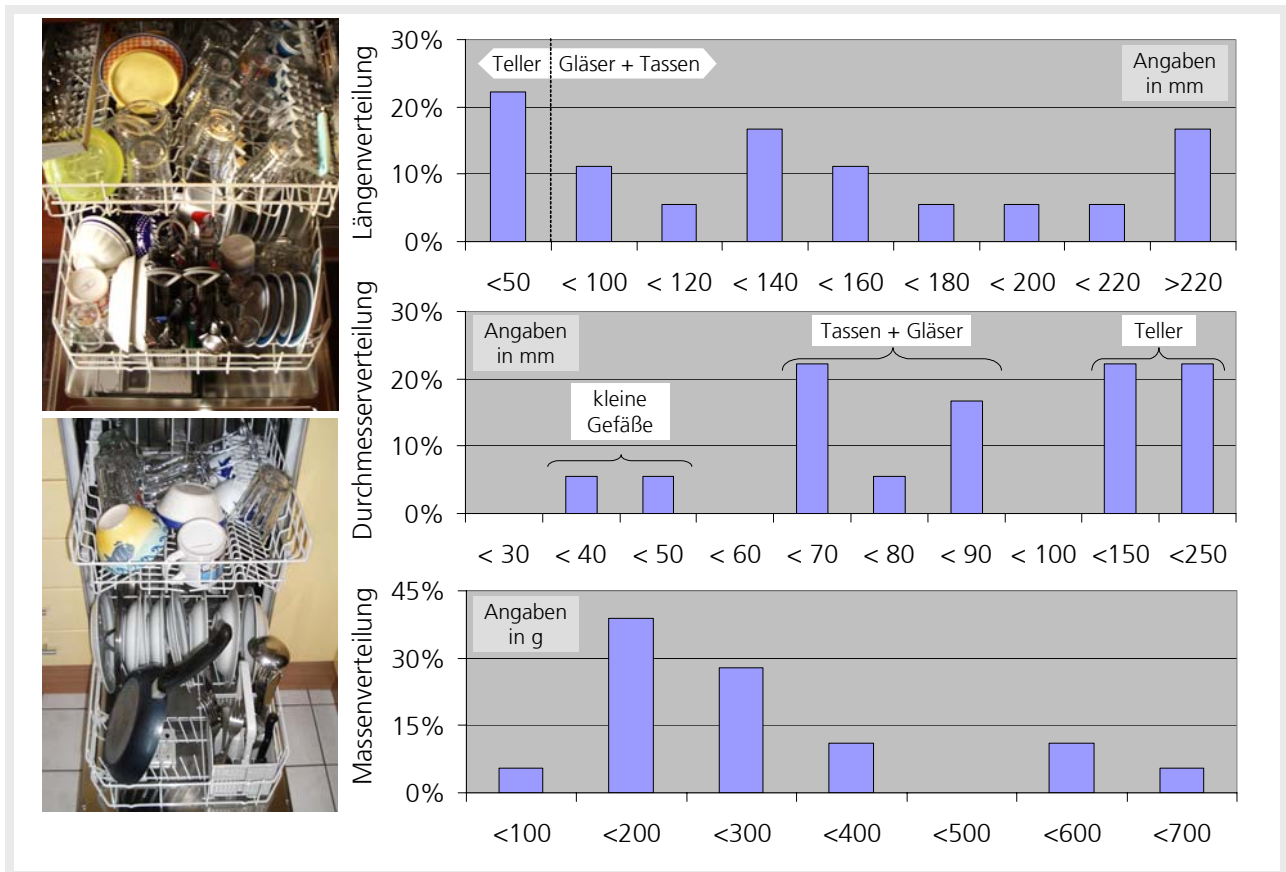


Abbildung 3-5: Typische Objekte beim Ausräumen einer Spülmaschine, inkl. Längen-, Durchmesser- und Massenverteilung einer Stichprobe von 18 Objekten.

Aufgrund der in der Spülmaschine vorhandenen Störkonturen (Spülmaschinegehäuse, Spülkorb, benachbarte Gegenstände) muss der Greifer kompakt aufgebaut sein.

A5: Der Greifer muss eine kompakte Bauform haben.

Das Handhaben im Bereich einer feuchten Einsatzumgebung erfordert hinsichtlich der elektrischen Komponenten einen gewissen Feuchtigkeitsschutz, so dass sich folgende Anforderung aufstellen lässt:

A6: Der Greifer muss der Schutzklasse IP65 entsprechen.

Die Anforderungen aus Kapitel 3.2 decken ansonsten das Szenario „Ausräumen einer Spülmaschine“ hinreichend genau ab.

3.4 Analyse der Handhabungsaufgabe beim Holen und Bringen von Gebrauchsgegenständen

Das Holen und Bringen von Gebrauchsgegenständen, wie Mobiltelefon, Fotoapparat, Werkzeug, päckchen- oder dosenförmige Gegenstände, erfordert das größte Maß an Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien. Der Vorgang ist im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass Gegenstände von ebenen Flächen orthogonal oder parallel zur Ablagefläche gegriffen und ebenso abgelegt werden oder einer Person der Gegenstand direkt überreicht wird.

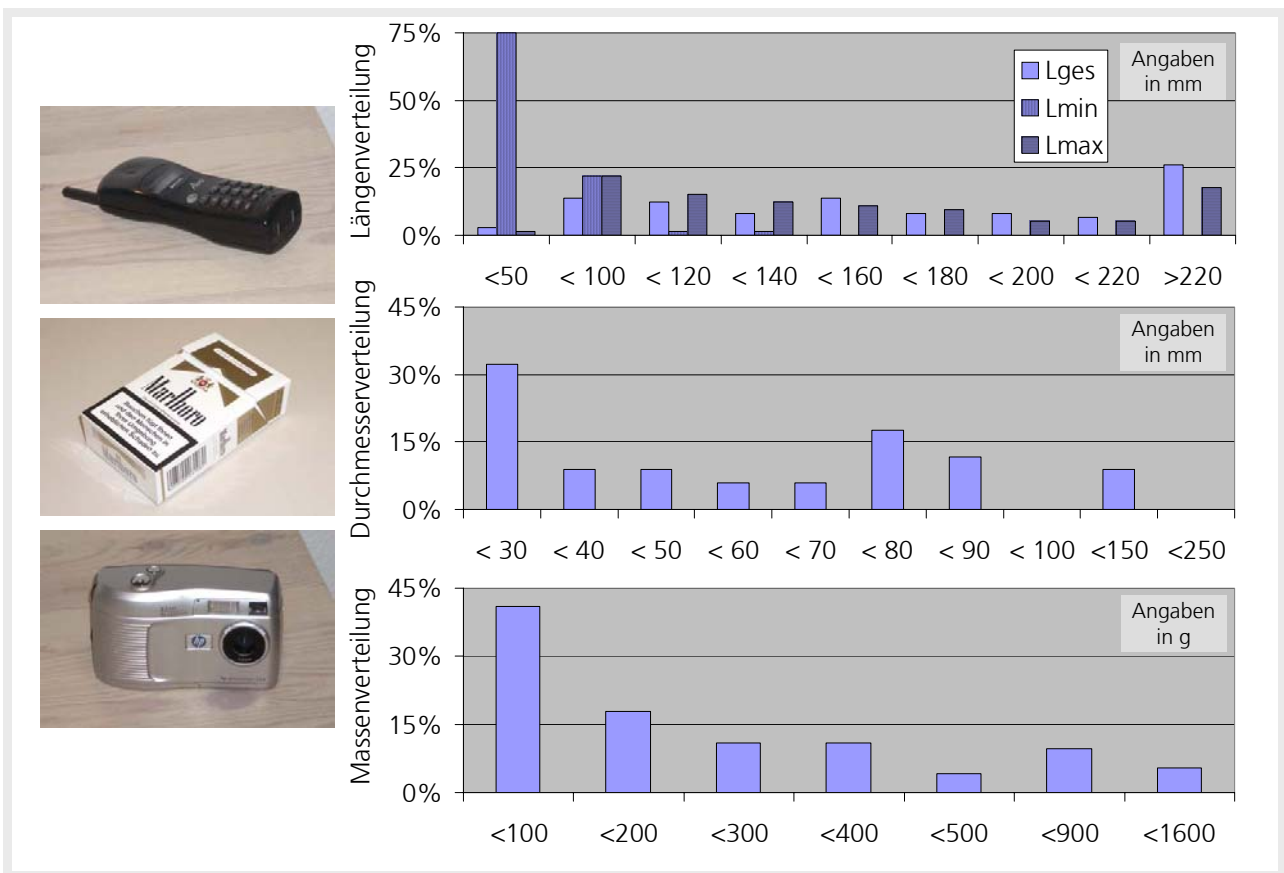


Abbildung 3-6: Typische Objekte beim Holen und Bringen von Gebrauchsgegenständen, inkl. Längen-, Durchmesser- und Massenverteilung einer Stichprobe von 73 Objekten.

Die Längenverteilung ist aufgeteilt in die Gesamtlänge der Objekte sowie die minimalen und maximalen Längen der approximierten Körper. Hierbei ist eine Häufung im Bereich kleiner als 50 mm zu erkennen. Es handelt sich dabei um kleine Gegenstände wie z.B. Salz- und Pfefferstreuer, Badgegenstände, Schachteln oder Kerzen. In Erweiterung zu den Griffmöglichkeiten aus den zuvor analysierten Szenarien kann folgende Anforderung hieraus formuliert werden:

A7: Der Greifer muss einen 2-Finger-Griff (auch Präzisionsgriff oder Pinzettengriff genannt) beherrschen, um kleine zylindrische oder quaderförmige Objekte mit einem Durchmesser oder einer Kantenlänge von größer als 10 mm greifen zu können.

Im Bereich der Gebrauchsgegenstände häufen sich quaderförmige Objekte. Ihre Kantenlängenverteilung entspricht in etwa der Durchmesserverteilung aus den zuvor analysierten Szenarien. Die Objekte können daher gut mit dem 3-Finger-Parallel-Griff und dem 2-Finger-Griff gehandhabt werden. Die Massenverteilung zeigt eine Häufung eher im Bereich kleiner 100 g. Die größte Masse ist ähnlich wie beim Servieren von Getränken im Bereich von 1,3 kg.

Die Umgebungstemperaturen aller Szenarien entsprechen den jahreszeitabhängigen Schwankungen im Heimbereich. Der Greifer muss daher keinen besonderen Temperaturen noch starke Temperaturschwankungen verkraften können.

A8: Der Greifer muss in einem Temperaturbereich von 15° bis 30° betrieben werden können.

3.5 Analyse von Armkinematiken für Roboterassistenten

Die mechanische Schnittstelle zwischen Greifer und mobiler Plattform des Roboterassistenten ist eine Armkinematik. In Form von Prototypen und Forschungsdemonstratoren existieren Armlösungen, die speziell für mobile Applikationen im Bereich der Servicerobotik konzipiert wurden. Abbildung 3-7 zeigt typische Roboterarme mit ihren technischen Daten.

Die Nutzlast für die dargestellten Arme variiert zwischen 3 und 14 kg. Aus der Analyse ergibt sich eine maximale Objektmasse von 1,3 kg. Für den statischen Fall bleibt für den Minimalfall der dargestellten Nutzlasten ein Restgewicht für den Greifer von 1,7 kg. Hieraus wird die folgende Anforderung formuliert:

A9: Das Gesamtmasse des Greifsystems sollte 1,7 kg nicht überschreiten.





Hersteller	Amtec	DLR	Neobotix	Neuronix
				
Technische Daten				
DOF	7	7	6	6
Nutzlast	3 kg	14 kg	4 kg	5 kg
Geschwindigkeit	356 °/s.	120 °/s	k.A.	90 °/s
Beschleunigung ¹⁾	2 m/s ²	2 m/s ²	0,5 m/s ²	1 m/s ²
Flanschdurchmesser	70 mm	k.A.	75 mm	k.A.
Gesamtlänge	1175 mm	936 mm	1000 mm	1000 mm
¹⁾ Schätzung				

Abbildung 3-7: Technische Daten von Roboterarmen für mobile Applikationen im Bereich der Servicerobotik

Die maximale Beschleunigung der dargestellten Armsysteme ist $a_{Arm} = 2 \text{ m/s}^2$. Unter Annahme eines schlechten Reibkoeffizienten von $\mu_{wc} = 0,1$ lässt sich nach der Beziehung

$$F_{Greifer} = m_{Greifobjekt} \cdot (a_{Arm} + g) \cdot \mu_{wc} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

eine notwendige Greifkraft von $F_{Greifer} = 30 \text{ N}$ berechnen. Daraus folgt die Forderung:

A10: Das Greifsystem muss einen maximale Greifkraft von $F = 30 \text{ N}$ aufbringen.

Die analysierten Arme bieten keine Möglichkeiten, weiteren Aktoren in die Armstruktur zu integrieren. Hände in integrierter Bauweise lassen sich nur adaptieren, wenn das Aktorpaket „Huckepack“ auf die Armkinematik montiert wird. Dies wiederum hat den Nachteil, dass eine Störkontur die Bewegungsfreiheit des Gesamtsystems einschränkt. Um die Bewegungsfreiheit des Arm-Hand-Systems nicht zu beeinträchtigen wird folgende Anforderung formuliert:

A11: Das Greifsystem muss in modularer Bauweise aufgebaut sein.

Eine gängige Versorgungsspannung bei mobilen Servicerobotern ist eine Gleichspannung in Höhe von 24 V. Um keine Spannungswandler zur Versorgung des Greifers installieren zu müssen und um eine Versorgung direkt aus dem Arm zu ermöglichen, wird die folgende Anforderung formuliert:

A12: Der Greifer soll mit 24 V Gleichspannung betrieben werden.

3.6 Analyse der steuerungstechnischen Integrationsmöglichkeiten von Werkzeugen in Roboterassistenten

Aus /Hans 2004/ geht hervor, dass Roboterassistenten ihre Handlungen in Echtzeit kontrollieren können müssen, d.h. das auch das Greifsystem in Echtzeit reagieren muss:

A13: Die Greifbefehle des Roboterassistenten müssen in Echtzeit in Greifaktionen umgesetzt werden.

Aus dieser Anforderung lässt sich die nächste Anforderung bzgl. der Planbarkeit des Greifvorganges ableiten:

A14: Die Griffe des Greifers müssen ausgehend von den Sensorinformationen eines Roboterassistenten in Echtzeit planbar sein.

Laut /Hans 2004/ ist eine weitere Anforderung an Roboterassistenten ihre einfache Erweiterbarkeit um neue Fähigkeiten. Neue Fähigkeiten entstehen z.B. durch die Erweiterung mit flexiblen oder spezialisierten Werkzeugen. Für ein flexibles Greifsystem lässt sich damit die folgende Anforderung ableiten.

A15: Der Greifer muss einfach in das übergeordnete Steuerungssystem eines Roboterassistenten eingebunden werden können.

Das bedeutet, dass der Greifer über eine dezentrale, in den Greifer integrierte Steuerungshardware verfügen muss, um die internen steuerungs- und regelungstechnischen Vorgänge nicht dem übergeordneten Steuerungssystem des Roboterassistenten zuordnen zu müssen. Zur Erfüllung der Anforderungen nach einer modularen Bauweise sowie einem niedrigen Gesamtgewicht muss diese Steuerung kompakt aufgebaut werden:

A16: Der Greifer muss über eine niedrige steuerungstechnische Komplexität verfügen.

3.7 Analyse der Einsatzszenarien von künstlichen Händen

Typische Einsatzszenarien für künstliche Hände werden in der Literatur in den Bereichen Weltraumrobotik, Prothetik und Servicerobotik vorhergesagt /Schraft 2004/.

Streng genommen kann der Einsatz im Weltraum zur Servicerobotik gezählt werden. Aufgrund seiner deutlich anderen Ausrichtung soll er allerdings getrennt betrachtet werden. Im Weltraum dienen künstliche Hände, die an einer Armkinematik angekoppelt sind, als eine Verlängerung des Armes des Astronauten. Die Armkinematik gleicht dabei nicht zwingend den Dimensionen und der kinematischen Anordnung der Achsen des menschlichen Arms. Der Astronaut kann z.B. Reparaturarbeiten an der Außenhülle seines Raumschiffes ausführen oder mechanische Arbeiten an Satelliten durchführen. Ein anthropomorphes Design der Hand ist wichtig, da sie möglichst die gleiche Geschicklichkeit aufweisen sollte wie die menschliche Hand. Die Steuerung der Bewegungen dieser Hände erfolgt über Datenhandschuhe, die durch den Astronauten oder das Bodenpersonal, welche den Arbeitsraum der Hand per Kamera überwachen, bedient werden. Aus diesem Grund sind hohe Geschwindigkeiten der Fingerbewegung bei künstlichen Händen für den Einsatz im Weltraum nicht erwünscht, da sie zu unkontrollierten Aktionen aufgrund menschlichen Handelns führen können. Das Gewicht solcher Hände ist ebenfalls von untergeordneter Rolle, da es bezogen auf das Gewicht des Gesamtsystems vernachlässigbar ist. Künstliche Hände sind bislang für den Einsatz im Weltraum noch in der Erprobungsphase /Butterfaß 2001/.

Für die Prothetik spielt zwar die Geschicklichkeit der Hand eine wesentliche Rolle, da sie die Einschränkung des Behinderten weitgehend relativiert. Für eine Akzeptanz der Hand ist aber ihr Gewicht von größerer Bedeutung. Der Träger empfindet Prothesen, deren Gewicht deutlich größer ist als das des fehlenden Körperteils als unangenehm /Schulz 2001/. Das führt dazu, dass zu schwere Prothesen nur für ausgewählte Arbeiten genutzt werden und ansonsten nicht getragen werden. Im Bereich der Forschung arbeitet man daran, Aktorsysteme zu entwickeln, die den Bau von leichten, der menschlichen Hand ähnlichen Prothesen möglich macht /Schulz 2004/. Das Erscheinungsbild spielt nicht nur aus ästhetischen Gründen eine wichtige Rolle. Technisch anmutende Hände erzeugen eine abstoßende Wirkung. Deshalb sind solche Hände sehr weich in Form und haptischem Empfinden zu gestalten. Die bisherigen Möglichkeiten zur Steuerung von Prothesen sind stark begrenzt.

Meist werden Steuerimpulse durch Muskelaktivierung im Unterarm erzeugt. Die Bandbreite möglicher „Befehle“ ist dabei gering und erfordert viel Übung für den Träger. Diese Einschränkung wirkt sich negativ auf die Geschicklichkeit der Hand aus, da nicht jedes Glied der Hand durch den Benutzer einzeln angesteuert werden kann. Die Handhabung beschränkt sich deshalb auf die Ansteuerung einzelner Griffe in Verbindung mit Befehlen zum Öffnen und Schließen der Hand.

Künstliche Hände für die Servicerobotik zielen auf den Einsatz in mobilen Roboterassistenten ab. Einsatzszenarien sind die Exploration unbekanntem Terrain, Sicherheitsanwendungen, d.h. vorwiegend die Bewachung von Objekten im privaten, industriellen und militärischen Bereich, und die Ausführung von Wartungs- und Reparaturarbeiten. Allen gemein ist die Verwendung auf einer mobilen Plattform, die ferngesteuert oder autonom betrieben wird. Die Energieversorgung erfolgt dabei von der Plattform aus. Die Hand befindet sich an einem Manipulator, der die Hand relativ zu den zu greifenden Objekten positioniert. Im Falle einer Fernsteuerung kann die Szene durch den Bediener kameraüberwacht und die Hand per Datenhandschuh gesteuert werden. Im autonomen Fall werden die notwendigen Informationen zum Greifen oder zur Manipulation von Objekten mittels Sensorsystemen durch den Roboterassistenten selbst akquiriert. Als Sensorsystem kommen neben Kameras auch 3D-Sensoren zum Einsatz /Ledermann 2004/. Aus diesen Sensorinformationen müssen dann Handlungsanweisungen in Form von Armbewegungen, Fingerkonfigurationen und Greifbewegungen berechnet werden. Der Planungs- und damit der Rechenaufwand sind enorm /Butterfaß 1999, Miller 2001/.

Abbildung 3-8 zeigt für eine Auswahl an künstlichen Händen den in Kapitel 2.2.3 vorgestellte anthropomorphe Index über die Anzahl der Freiheitsgrade der jeweiligen Hand.

Die Entwicklungslinien gehen in Richtung einer stetigen Erhöhung der angetriebenen Freiheitsgrade künstlicher Hände. Diese führt zu mechanisch und steuerungstechnisch komplexen Händen, die zwar die Flexibilitätsanforderungen erfüllen, die Anforderungen bzgl. einfacher Anbindung und echtzeitfähiger Planbarkeit von Griffen nur unzureichend abdecken.

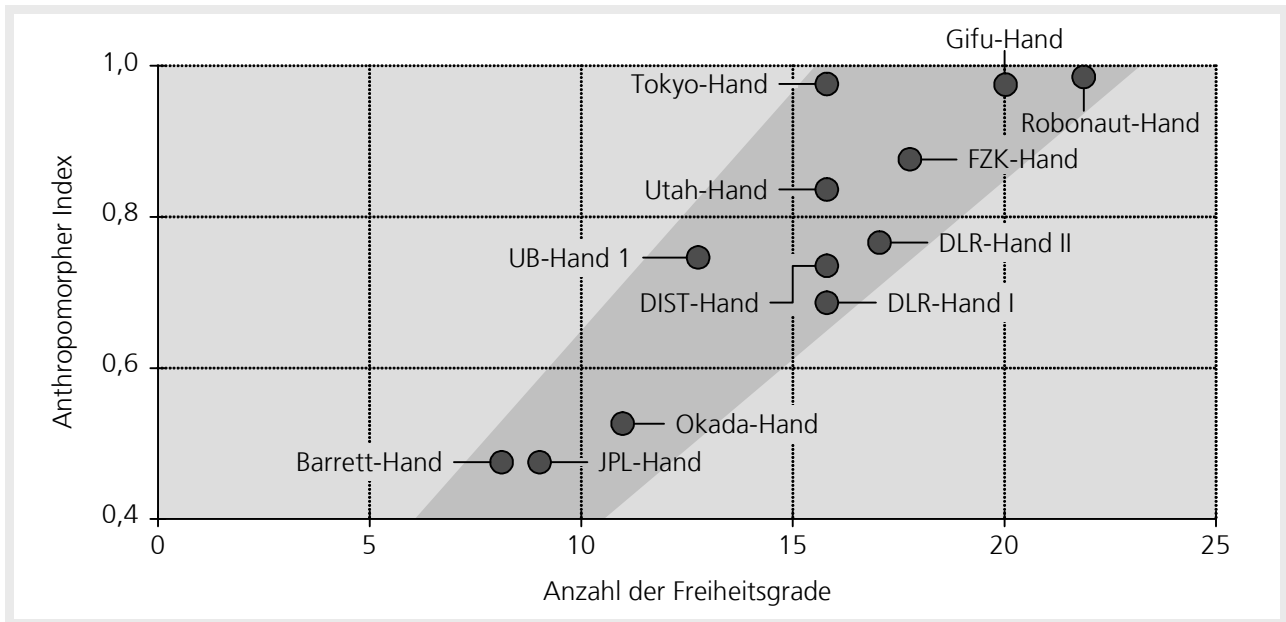


Abbildung 3-8: Künstliche Hände nach dem Stand der Technik, dargestellt nach ihrem anthropomorphen Index über der Anzahl ihrer Freiheitsgrade.

Als Ergänzung zu den in den Kapiteln 3.2 bis 3.6 erarbeiteten Anforderungen wird zur Erreichung einer niedrigen mechanischen Komplexität die folgende Anforderung formuliert:

A17: Die Anzahl der Bauteile für den Greifer muss minimiert werden, um eine niedrige mechanische als auch steuerungstechnische Komplexität des Systems zu erreichen.

3.8 Folgerungen aus den Analyseergebnissen

Die Analyse der potenziellen Einsatzszenarien für Roboterassistenten im Haushaltsbereich verdeutlicht die enormen Flexibilitätsanforderungen an solche Systeme hinsichtlich der Handhabung unterschiedlicher Objektgeometrien und Objektgrößen. Aus der Analyse konnten quantifizierbare Anforderungen hinsichtlich der benötigten Griffe, d.h. der minimalen Anzahl an Fingerkonfigurationen sowie der entsprechenden Greifräume abgeleitet werden.

Die Analyse der Armkinematiken von Roboterassistenten und der steuerungstechnischen Integrationsmöglichkeiten unterstreichen die Notwendigkeit niedrig komplexer Greifsysteme. Die hier ermittelten Anforderungen sind wichtig für die technische Auslegung eines flexiblen Greifsystems. Bei Erfüllung der Anforderungen ist weiterhin eine breite

Anwendbarkeit in Roboterassistenten für den Haushaltsbereich nicht nur für Forschungsdemonstratoren, sondern besonders auch für künftige kommerzielle Produkte zu erwarten.

Die Analyse der Einsatzszenarien von künstlichen Händen macht deutlich, dass die erarbeiteten Anforderungen nach Flexibilität und niedriger Komplexität vom Stand der Technik nicht abgedeckt werden und dass die Entwicklungstendenzen künstlicher Hände weg von den für Roboterassistenten wichtigen Anforderungen zu erkennen sind.

3.9 Zusammenfassung und Strukturierung der Anforderungen an ein Greifsystem zum Greifen geometrievarianter unbekannter Objekte für Roboterassistenten im Haushalt

3.9.1 Definition von Teilsystemen eines Greifsystems zum Greifen geometrievarianter, unbekannter Objekte für Roboterassistenten im Haushalt

Die Teilsysteme eines flexiblen Greifsystems sind das Antriebssystem, das Teilsystem zur Fingerkonfiguration, das Fingersystem und das Steuerungssystem. Abbildung 3-9 zeigt die Teilsysteme in ihrem Zusammenhang sowie die Schnittstellen zum kinematisch übergeordneten Armsystem und zum übergeordneten Steuerungssystem des Roboterassistenten. Das Greifsystem, im Wesentlichen die Finger, bilden die Schnittstelle z.B. zu den Objekten, die durch den Roboterassistenten gehandhabt werden sollen.

Die Aufgabe des Antriebssystems ist es, die notwendige Energie zur Konfiguration der Finger, zur Adaption der Fingerkinematik sowie zur Aufbringung der Greifkraft bereitzustellen. Neben der Erzeugung der Energie, meist in Form einer rotatorischen oder einer linearen Bewegung beinhaltet das Antriebssystem auch Komponenten zur mechanischen Kopplung an die Teilsysteme Fingerkonfiguration und Finger, z.B. Getriebe oder Gestänge.

Das Teilsystem Fingerkonfiguration dient zur Positionierung der Finger relativ zum zu greifenden Objekt. Die Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien wird maßgeblich durch die Fingerkonfigurationsmöglichkeiten des Gesamtsystems bestimmt. Auch die Komplexität des gesamten Greifsystems steht in engem Zusammenhang mit diesem Teilsystem.

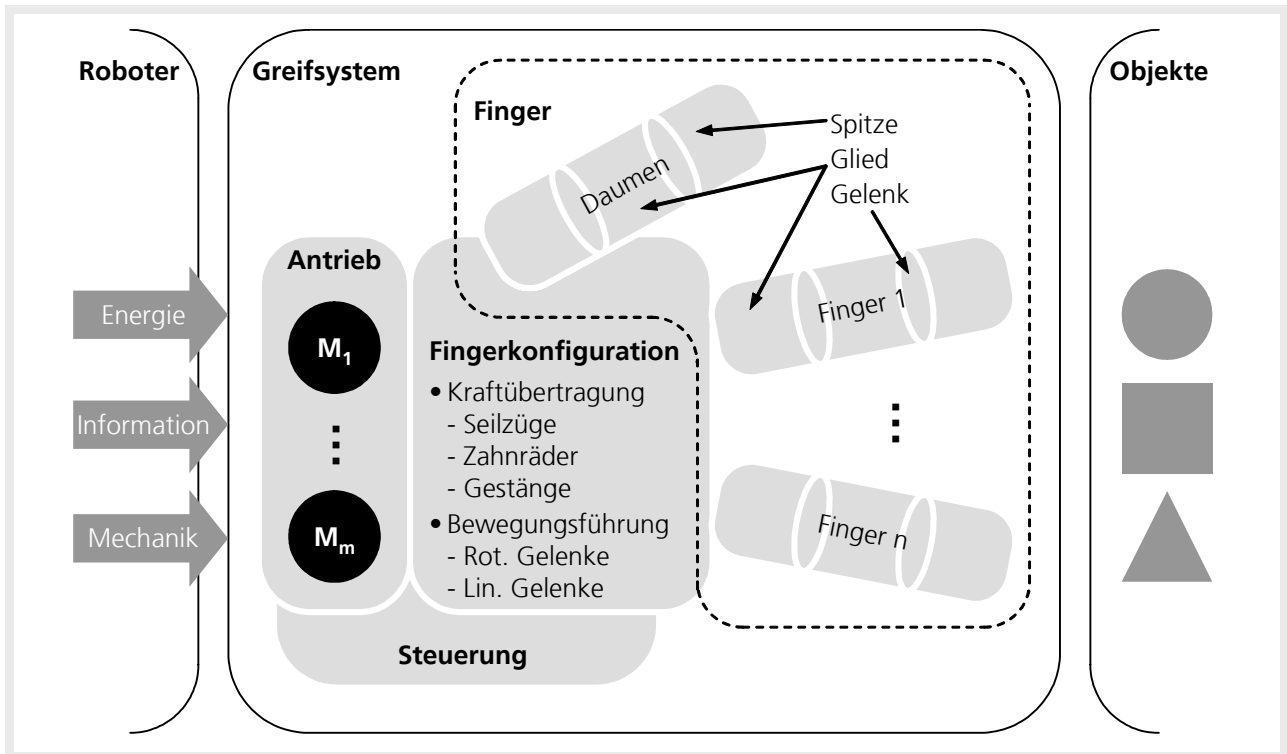


Abbildung 3-9: Teilsysteme von Greifsystemen zum Greifen geometrievarianter, unbekannter Objekte für Roboterassistenten im Haushalt

Das Fingersystem bildet den direkten Kontakt zwischen Greifsystem und Greifobjekt. Es leitet die Greifkraft in das Greifobjekt ein. Über die Anzahl der durch das Fingersystem erzeugbaren Kontaktpunkte zwischen Greifsystem und Greifobjekt wird die Sicherheit des Griffes hinsichtlich eines Verlustes des Greifobjektes bestimmt.

3.9.2 Strukturierung der Anforderungen und Zuordnung zu den definierten Teilsystemen

In Abbildung 3-10 werden die erarbeiteten Anforderungen strukturiert und ihr Einfluss auf die definierten Teilsysteme aufgezeigt. Die Zuordnung zu den Teilsystemen gibt wichtige Hinweise wo konzeptionelle Schwerpunkte zu legen sind sowie für die Auslegung von Greifsystemen für Roboterassistenten im Haushalt.

Anforderungen			Teilsysteme			
			Antrieb	Finger- konfiguration	Finger	Steuerung
Mechanisches Design des Greifsystems						
A11	Bauweise	Modular	●	●	●	●
A5	Größe des Greifers	Kompakte Bauform	●	●	●	●
A9	Gesamtmasse [kg]	< 1,7 kg	●	●	●	●
A10	Greifkraft (Gesamt)	30 N	●	○	◐	○
A3	Je nach Form des Greifobjektes hohe Anzahl an Kontaktpunkten		○	◐	●	○
A17	Minimierung der Anzahl der Bauteile		●	●	●	●
Greifspektrum						
A1	3-Finger-Parallel-Griff	$h_{Obj} > 100 \text{ mm}; d_{Obj}, l_{Obj} < 100 \text{ mm}$	◐	●	●	○
A4	3-Finger-Parallel-Griff	$h_{Obj} > 20 \text{ mm}; d_{Obj}, l_{Obj} > 100 \text{ mm}$	◐	●	●	○
A2	3-Finger-Zentrisch-Griff	$d_{Obj} > 60 \text{ mm}$	◐	●	●	○
A7	2-Finger-Griff	$d_{Obj}, l_{Obj} > 10 \text{ mm}$	◐	●	●	○
Schnittstellen und Steuerung des Greifsystems						
A13	Die Greifbefehle müssen in Echtzeit in Greifaktionen umgesetzt werden		●	●	●	●
A14	Die Griffe des Greifers müssen ausgehend von Sensorinformationen eines Roboterassistenten schnell und einfach planbar sein		●	●	●	●
A15	Der Greifer muss einfach in das übergeordnete Steuerungssystem eines Roboterassistenten eingebunden werden können		○	◐	○	●
A16	Der Greifer muss über eine niedrige steuerungstechnische Komplexität verfügen		●	●	●	●
Sonstige Anforderungen						
A12	Spannungsversorgung	24 V	●	○	○	●
A8	Umgebungstemperatur	15 bis 30 °C	○	○	○	○
A6	Schutzklasse	IP65	●	○	○	●
Legende: ● Großer Einfluss ◐ Mäßiger Einfluss ○ Geringer bzw. kein Einfluss						

Abbildung 3-10: Strukturierung der Anforderungen und Zuordnung zu den definierten Teilsystemen

4 Lösungsansätze für ein flexibles Greifsystem

4.1 Lösungsansätze für das Antriebssystem

Elektrische Antriebe sind als rotatorische und translatorische Antriebe erhältlich. Translatorische Antriebe sind als eindimensionale Linearantriebe und als zweidimensionale Planarantriebe verfügbar. Weiterhin existieren unterschiedliche Prinzipien, um elektrische Energie in Bewegung zu transformieren. Alle elektrischen Antriebe besitzen eine hervorragende Regelbarkeit von Geschwindigkeit, Position und Drehmoment und zeichnen sich durch ein gutes Leistungs/Gewichts-Verhältnis aus. Weiterhin steht ein großes Leistungs- und Produktspektrum am Markt zur Verfügung /Hering 1999/.

Fluidische Antriebe lassen sich in pneumatische und hydraulische Antriebe aufteilen. Bei den pneumatischen dient ein Gas (meist Luft) als Medium, bei den hydraulischen kommt eine Flüssigkeit (meist Öl) zum Einsatz. Zur Druckerzeugung müssen Pumpen eingesetzt werden, was zu einem schlechten Leistungs/Gewichts-Verhältnis gegenüber elektrischen Antrieben führt /Wegener 2004b/. Pneumatische Antriebe lassen sich aufgrund der Kompressibilität gegenüber den hydraulischen Antrieben nur schlecht regeln. Bauformen sind Linearzylinder, Rotationszylinder und künstliche Muskeln, die meist nach dem Prinzip von McKibben realisiert sind /Festo 2005/.

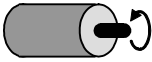
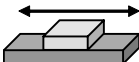
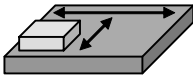






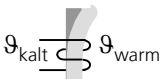
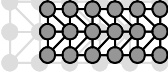
Piezoelektrische Antriebe kommen meist in Anwendungen, bei denen hohe Präzision bei geringem Verfahrweg gefordert ist, zum Einsatz /Barth 2000/.

Formgedächtnislegierungen (FGL, engl.: Shape Memory Alloy) sind Legierungen, die aufgrund von Temperaturänderungen reversibel ihre Form ändern. Aufgrund der großen Zeitkonstanten geschieht besonders die Abkühlphase nur sehr langsam. Eine aktive Kühlung beschleunigt zwar diesen Vorgang, führt aber zu einem erhöhten apparativen Aufwand /Wegener 2004b/.

Elektroaktive Polymere (EAP) sind Kunststoffe, die sich unter Spannungseinwirkung verformen. Sie können in elektrisch und ionisch aktivierbare Polymere eingeteilt werden. Die elektrisch verformbaren Polymere behalten ihre Formänderung bei angelegter elektrischer Spannung bei und können so als Aktoren eingesetzt werden.

Aktoren auf Basis elektroaktiver Polymere existieren bislang nur als Forschungs-
demonstratoren /Kornbluh 1998/.

Abbildung 4-1 fasst die beschriebenen Antriebsprinzipien mit ihren Ausprägungsformen
und ihren charakteristischen Merkmalen zusammen.

Prinzip	Ausprägung	Bewertung der Eigenschaften		Skizze	
Elektrisch	rotatorisch	+ Regelbarkeit + Gewicht/Leistung + Dynamik	+ Robustheit + Leistungsspektrum + Verschleißarm		
	linear	1D	+ Regelbarkeit + Dynamik + Robustheit	+ Verfahrbereich + Verschleißfrei – Gewicht/Leistung	
		2D	+ Regelbarkeit + Dynamik + Robustheit	+ Verschleißfrei – Gewicht/Leistung – Kabel notwendig	
Fluidisch	Zylinder	rot.	+ Gewicht/Leistung + Dynamik + Robustheit	+ Leistungsspektrum + Verfügbarkeit – Regelbarkeit	
		lin.	+ Gewicht/Leistung + Dynamik + Robustheit	+ Leistungsspektrum + Verfügbarkeit – Regelbarkeit	
	McKibben-Muskel	+ Gewicht/Leistung + Robustheit + Dynamik	+ Leistungsspektrum – Regelbarkeit – Verfahrweg		
Piezoelektrisch	rotatorisch	+ Regelbarkeit	– Leistungsspektrum – Verfügbarkeit		
	linear	+ Regelbarkeit	– Leistungsspektrum – Verfügbarkeit		
FGL	ungekühlt	+ Robustheit – Gewicht/Leistung – Leistungsspektrum	– Verfügbarkeit – Dynamik – Regelbarkeit		
	aktiv gekühlt	+ Robustheit – Gewicht/Leistung – Leistungsspektrum	– Verfügbarkeit – Dynamik – Regelbarkeit		
EAP	Muskel	+ Robustheit + Gewicht/Leistung + Leistungsspektrum	+ Dynamik – Regelbarkeit – Verfügbarkeit		

Legende: + Vorteil – Nachteil

Abbildung 4-1: Lösungsansätze für das Antriebssystem

4.2 Lösungsansätze zur Fingerkonfiguration

Das Teilsystem Fingerkonfiguration muss neben der geometrischen Konfiguration der Finger auch die benötigte Energie zum Aufbringen der Greifkraft bereitstellen. Lösungsansätze zur Fingerkonfiguration setzen sich somit aus den Funktionen Fingeranordnung, Kraftübertragung und Führung zusammen.

4.2.1 Fingeranordnung

Aus /Butterfaß 1999/ geht hervor, dass Hände zur Erforschung von automatischen Greif- und Manipulationsmöglichkeiten über eine symmetrische Anordnung der Finger um eine zentrale Handfläche verfügen sollten. Abbildung 4-2 zeigt mögliche Fingeranordnungen für Fingerzahlen zwischen zwei und fünf aus der Draufsicht.

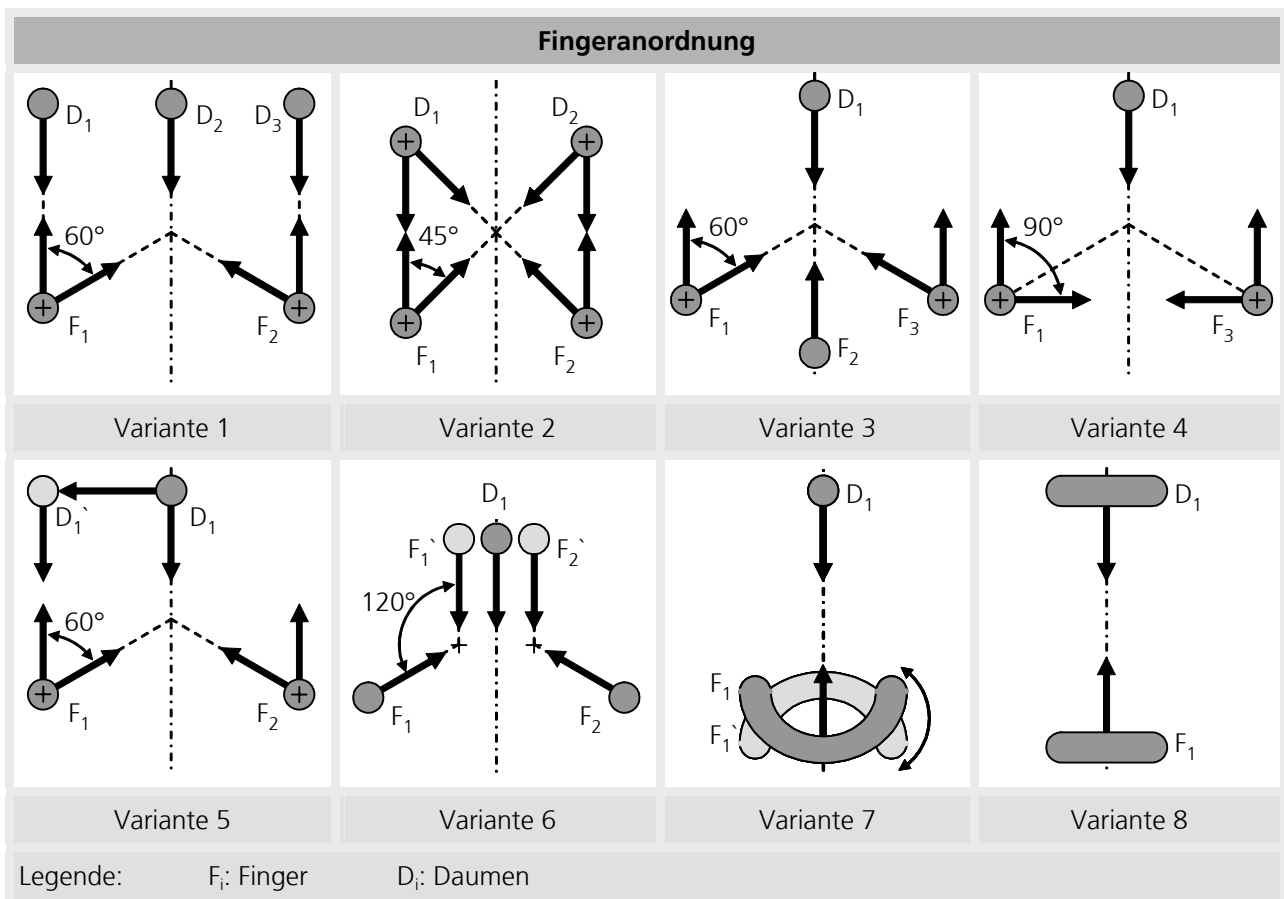


Abbildung 4-2: Lösungsvarianten bestehend zur Anordnung und Konfiguration von fünf, vier, drei und zwei Fingern.

Bei der Anordnung der Finger wurde darauf geachtet, dass mindestens ein Finger den anderen opponierend angeordnet ist. In Analogie zur menschlichen Hand werden diese

Finger im Folgenden Daumen genannt und sind mit einem D gekennzeichnet. Um unterschiedliche Fingeranordnungen beurteilen zu können, muss neben ihrer Position auch ihre Greifrichtung bekannt sein. In Abbildung 4-2 ist dies durch einen dicken Pfeil symbolisiert. Die Art der Greifbewegung, ob es sich um eine lineare oder rotatorische Bewegung handelt, wurde dabei vernachlässigt. Um die geforderte Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien zu erreichen, kann es sinnvoll sein, die Fingeranordnung zu ändern. Diese Änderung kann durch eine räumliche Veränderung einzelner Finger entlang einer Raumkurve realisiert werden. In den einfachsten Fällen handelt es sich bei einer Bahn um eine lineare oder eine kreisförmige Bewegung um einen festen Drehpunkt. In Abbildung 4-2 sind die Drehpunkte mit einem Kreuz gekennzeichnet und die Greifbahnen durch gestrichelte Linien.

In Variante 1 werden drei Daumen verwendet, die für die unterschiedlichen Griffmöglichkeiten optional angesteuert werden. Ihnen gegenüber befinden sich zwei schwenkbare Finger, die ihre Greifrichtung zwischen einem Parallelgriff und einem Zentrischgriff ändern können. Der 2-Finger-Griff kann durch Ansteuerung von D_1 und F_1 oder D_3 und F_2 erreicht werden. Diese redundante Anordnung macht allerdings nur Sinn, wenn die Bewegungsmöglichkeiten der Armkinematik, insbesondere der Drehachse im Handgelenk der Kinematik, eingeschränkt sind.

Variante 2 verzichtet auf einen mittig angeordneten Daumen. Die Griffmöglichkeiten sind die gleichen wie bei Variante 1, jedoch wirken beim Parallelgriff und beim Zentrischgriff je vier Kräfte auf das Greifobjekt, was zu einer statischen Überbestimmtheit des Griffes führt.

In Variante 3 werden der 3-Finger-Parallel-Griff und der 3-Finger-Zentrisch-Griff durch das Zusammenspiel der Finger D_1 , F_1 und F_3 erreicht, der 2-Finger-Griff durch die Finger D_1 und F_2 . Wie schon bei den Varianten 1 und 2 entstehen auch hier Störkonturen durch nicht benutzte Finger. Das Problem kann konstruktiv dadurch gelöst werden, dass die Finger in ihrer Endlage aus dem Greifraum weggeklappt werden, was wiederum Störkonturen bzgl. der Umgebung der Greifposition erzeugt.

Die Variante 4 entspricht der in Abbildung 2-7 dargestellten SARAH-Hand. Sie kann, durch einen um 30° größeren Drehwinkel der Finger F_1 und F_2 gegenüber der Variante 3, die gleichen Griffe ausführen und verfügt dabei über einen Finger weniger. Im 2-Finger-Griff wirkt der Daumen als Störkontur.

Variante 5 löst dies, indem der Daumen in zwei Positionen verschiebbar ist und der 2-Finger-Griff durch den Daumen und den Finger F_1 realisiert wird. Der Parallelgriff und der Zentrischgriff werden genau wie bei den Varianten 1, 3 und 4 realisiert.

Auch Variante 6 realisiert diese Griffe auf diese Art. Variante 6 entspricht der Fingeranordnung der ebenfalls in Kapitel 2.2.3 dargestellten Barrett-Hand. Der 2-Finger-Griff wird realisiert, in dem die Finger F_1 und F_2 , durch eine 90° -Drehung, genau gegenüber angeordnet werden. Die Fingeranordnung ist im Besonderen dadurch gekennzeichnet, dass der Drehpunkt der Finger nicht in ihrem Zentrum sitzt. Das ermöglicht der Hand einen so genannten Klammergriff, d.h. ein Umschließen des Greifobjektes ohne opponierenden Finger. Dies funktioniert allerdings nur unter Verwendung mehrgliedriger Fingerkinematiken, deren Fingerspitzen auf die andere Seite des Greifobjektes reichen müssen.

Die Varianten 7 und 8 bestehen jeweils nur aus zwei Fingern. Variante 7 verfügt im Gegensatz zu Variante 8 über einen rotierenden Finger. Somit ist neben einen Zwei-Punkt-Griff auch ein Drei-Punkt-Griff möglich. Durch die Ausformung des rotierenden Fingers kann der Parallelgriff und der Zentrischgriff realisiert werden, allerdings ist das Greifspektrum stark eingeschränkt.

4.2.2 Kraftübertragung und Führung

Abbildung 4-3 zeigt Umsetzungsmöglichkeiten zur Erfüllung der Funktionen „Kraftübertragung“ und „Führung“. Durch Kombination der Umsetzungsmöglichkeiten der beiden Funktionen können Lösungsansätze für das Teilsystem Fingerkonfiguration abgeleitet werden (siehe Kapitel 4.4).

Bezogen auf die Funktion „Kraftübertragung“ haben die Umsetzungsmöglichkeiten Seilzug, Kette und Riemen gegenüber den Umsetzungsmöglichkeiten Zahnrad und Hebel/Gestänge den Nachteil, dass eine Spannvorrichtung benötigt wird. Eine magnetische Kraftübertragung macht nur für sehr kleine Greifkräfte ($\ll 1$ N) Sinn, da aufgrund des hohen Energieverbrauches die zur Verfügung stehende Kapazität von Akkumulatoren auf mobilen Systemen schnell verbraucht würde.

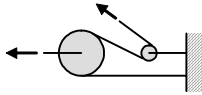

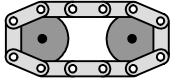
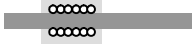


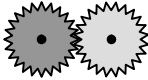





Kraftübertragung		Führung		
Seilzug		Kugelführung	rot.	
Kette			lin.	
Riemen		Gleitführung	rot.	
Zahnräder			lin.	
Hebel/Gestänge		Luftpolster		
Magnetismus		Magnetismus		

Abbildung 4-3: Lösungsansätze zur Fingerkonfiguration

Bezüglich der Funktion „Führung“ bietet die Umsetzungsmöglichkeiten der Kugelführung gegenüber der Umsetzungsmöglichkeiten der Gleitführung Vorteile hinsichtlich ihrer Reibeigenschaften. Nachteilig ist der größere Bauraum kugelbehalteter Führungskomponenten. Luftpolster und Magnetismus, d.h. kontaktlose Führungen benötigen viel Energie zum Betrieb, bieten aber den Vorteil einer absoluten Reibungsfreiheit.

4.3 Lösungsansätze für das Fingersystem

Wie schon beim Teilsystem Fingerkonfiguration kann das Fingersystem in zwei Funktionen gegliedert werden: Die Adaption an die Objektgeometrie und die Kontaktierung, d.h. die Übertragung der Greifkraft auf das Objekt sowie Reibeigenschaften zwischen Finger und Objekt. Abbildung 4-4 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten zur Umsetzung dieser Funktionen.

Adaption				Kontaktfläche					
Seilzug		Aktive Gelenke ¹⁾		Spinnennetz		Reibauflage		Nadeln	
Gestänge		Zahnrad		Polymerschaum		Adhäsives Material z.B. „Gecko“-Material		Saugelemente	

¹⁾ Vergleiche hierzu Kapitel 4.1 „Lösungsansätze für das Antriebssystem“

Abbildung 4-4: Lösungsansätze für das Fingersystem

4.4 Integration der Lösungsansätze zu Gesamtsystemvarianten

Die in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 konzipierten Lösungsansätze werden im Folgenden zu Gesamtsystemvarianten kombiniert. Dabei wird der Lösungsraum unabhängig der Anzahl der Antriebe und Finger aufgespannt, um die vielfältigen Möglichkeiten zur Umsetzung von flexiblen Greifsystemen zu verdeutlichen.

4.4.1 Variante 1: 2D-Linearmotor mit dreigliedrigen aktiven Fingern

Variante 1 besteht aus einem zweidimensionalen Linearmotor mit dreigliedrigen aktiven Fingern. Der Linearmotor kann jeden Finger einzeln in der Ebene (ähnlich einer xy-Kinematik) verfahren. Die Läufer befinden sich dabei in der jeweiligen Fingerbasis. Der Linearmotor kann um weitere Finger erweitert werden. Abbildung 4-5 zeigt eine Konfiguration mit drei Fingern.

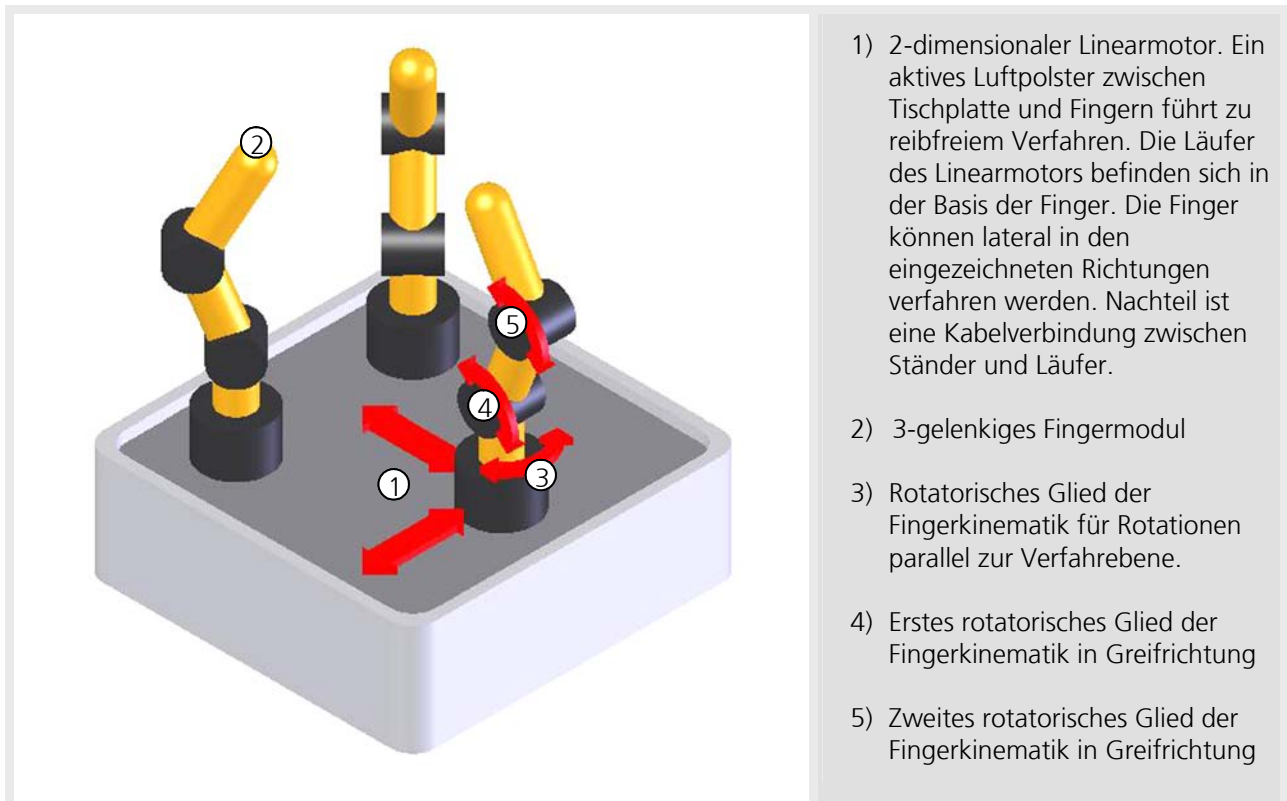


Abbildung 4-5: Gesamtsystemvariante 1: 2D-Linearantrieb mit drei dreigliedrigen aktiven Fingerkinematiken

Jeder Finger verfügt über drei Antriebe. Ein Antrieb in der Fingerbasis ermöglicht eine Drehung um die Hochachse des Fingers. Je ein Antrieb zwischen den Gliedern eins und zwei sowie zwischen den Gliedern zwei und drei sorgen für eine automatische Adaption an das zu greifende Objekt.

Ein so aufgebautes Greifsystem bietet ein sehr hohes Maß an Flexibilität gegenüber sich ändernden Geometrien der Greifobjekte. Aufgrund des modularen Aufbaus (jeder Finger ist nur über ein Magnetfeld an die Plattform gekoppelt) kann die Anzahl der Finger leicht variiert werden.

Aufgrund der Vielzahl an Antrieben wird das Greifsystem sowohl bzgl. der Mechanik als auch bzgl. der Steuerungstechnik sehr komplex. Die Planung eines Griffes erfordert hohen Rechenaufwand und stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar. Der Ständer des Linearantriebs ist durch die Wicklungspakete sehr schwer, was das Handhabungsgewicht relativ zur Nutzlast der Armkinematik verkleinert.

4.4.2 Variante 2: 2-Finger-Greifer mit elastischen „Netz fingers“

Variante zwei besteht aus zwei Fingern, die durch je zwei pneumatische Muskeln angetrieben werden. Ein Muskel sorgt dabei für die Schließbewegung, der andere Muskel für die Öffnung der Finger. Jeder Finger ist einzeln ansteuerbar. Die Kraftübertragung erfolgt durch Hebel.

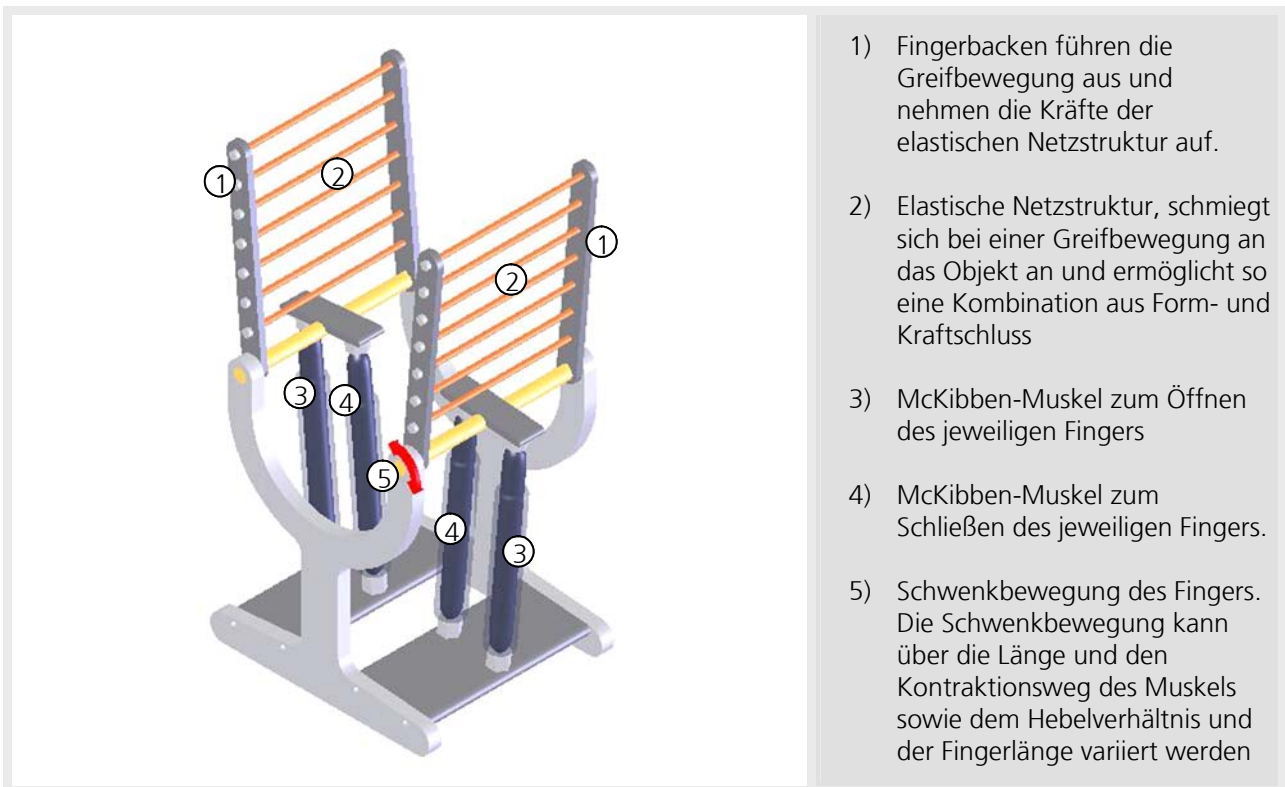


Abbildung 4-6: Gesamtsystemvariante 2: 2-Finger-Greifer mit selbstadaptiven, passiven Fingern

Jeder Finger besteht aus zwei Flanken, zwischen denen Gummibänder gespannt sind. Die Gummibänder passen sich beim Griff der Form des jeweiligen Greifobjektes an.

Der extrem einfache und robuste Aufbau kennzeichnet dieses Greifsystem. Mechanisch und steuerungstechnisch gleicht es dem Aufbau heute verfügbarer industrieller Greifer.

Die Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien ist jedoch trotz der Anpassungsfähigkeit der Gummibänder wegen der bevorzugten Greifrichtung (parallel zu den Fingerflanken) eingeschränkt.

4.4.3 Variante 3: 3-Finger-Greifer mit selbstadaptiven, passiven Fingern

Variante drei verfügt über drei Finger, die in Anlehnung an den in Kapitel 2.2.5 dargestellten Finray-Effekt konzipiert sind. Jeder Finger verfügt dabei über vier Glieder. Jedes Glied besteht aus einer vorderen und einer hinteren Phalanx, die über einen Querstab miteinander verbunden sind. Einzig die Fingerspitze (oberstes Glied) verfügt über keinen Querstab. Das so aufgebaute Gestänge schmiegt sich selbstadaptiv an die Objektgeometrie an.

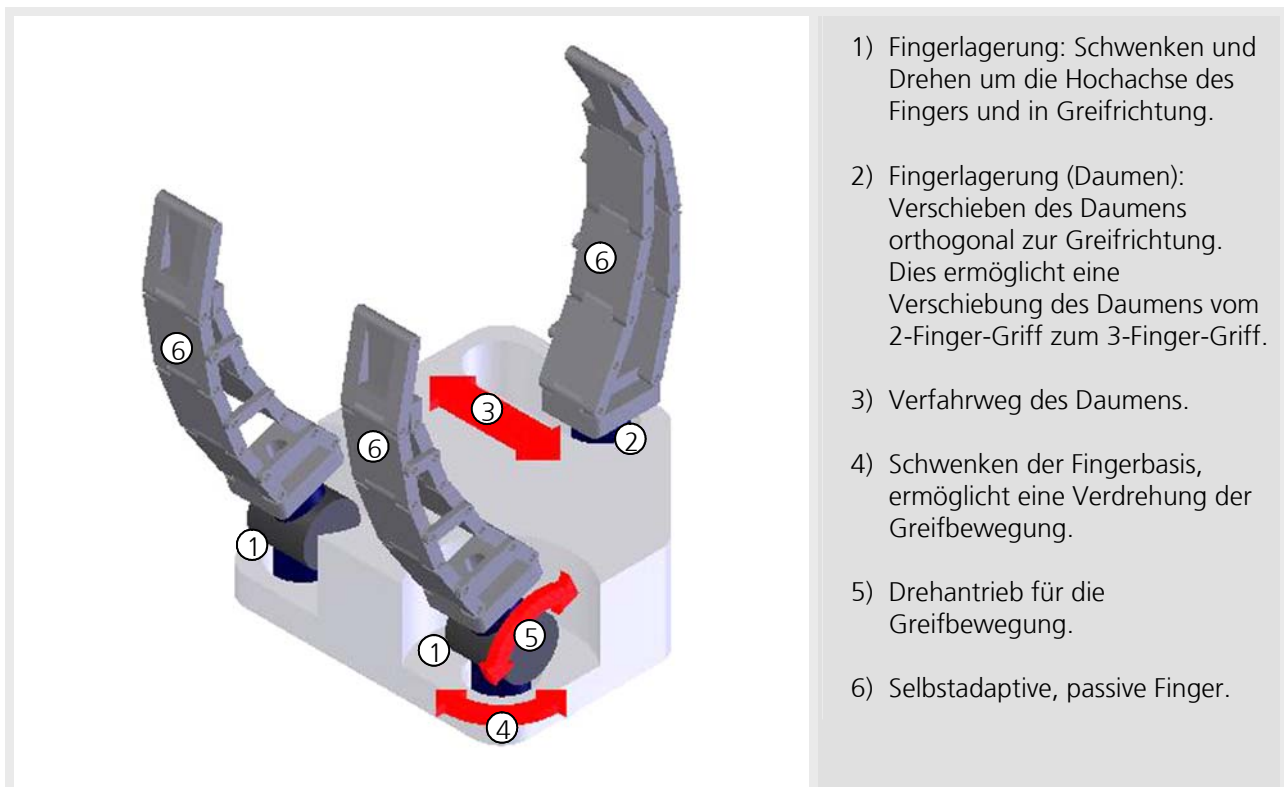


Abbildung 4-7: Gesamtsystemvariante 3: 3-Finger-Greifer mit selbstadaptiven, passiven Fingern

Die Rückstellung der Glieder in ihre Grundkonfiguration geschieht durch Drehfedern zwischen den einzelnen Gliedern.

Das Teilsystem zur Fingerkonfiguration geht auf Variante 5 aus Kapitel 4.2.1 zurück. Es besteht aus einem Antrieb für einen opponierenden Finger (den Daumen) und je einem Antrieb für die beiden Finger. Die Basis des Daumens lässt sich in zwei Positionen verfahren und ermöglicht so einen 2-Finger-Griff und einen 3-Finger-Griff. Der Daumen ist ansonsten bzgl. der Greifbewegung starr angeordnet. Die beiden Finger können sich um ihre Hochachse drehen und ermöglichen so einen Parallelgriff (2- und 3-Finger-Griff) und einen Zentrisch-Griff (3-Finger-Griff).

Vorteil dieses Greifsystems ist die große Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien, die ohne Aktoren in den Fingern auskommt. Die Fingerkonfiguration ermöglicht drei Grundgriffe, mit denen eine Vielzahl von Objekten gegriffen werden kann. Die Fingerkonfiguration ist aus steuerungstechnischer Sicht niedrig komplex.

Fehlende Kenntnisse über das Bewegungsverhalten der Fingerkinematik sowie über die Planbarkeit von Griffen für variantenreiche Greifobjekte wirken sich nachteilig aus.

4.5 Bewertung der Gesamtsystemvarianten

Die Bewertung erfolgt anhand der in Kapitel 3 erarbeiteten Anforderungen. Jede Anforderung wird mit den Erfüllungsgraden „voll erfüllt“, „teilweise erfüllt“ und „unzureichend erfüllt“ bewertet.

Die Bewertung zeigt die Stärken und Schwächen der drei Konzepte bzgl. der Anforderungsklassen „Mechanisches Design des Greifsystems“, „Greifspektrum“, „Schnittstellen und Steuerung des Greifsystems“ und „Sonstige Anforderungen“.

In Abbildung 4-8 ist die Bewertung der drei Gesamtsystemvarianten dargestellt.

Anforderung	Variante 1	Variante 2	Variante 3
A11 Modulare Bauweise	●	●	●
A5 Kompakte Bauform	○	◐	●
A9 Gesamtmasse < 1,7 kg	○	●	●
A3 Hohe Anzahl an Kontaktpunkten	●	◐ ³⁾	◐ ²⁾
A17 Geringer technischer Aufwand	○	●	●
A1 3-Finger-Parallel ($h_{Obj} > 100$ mm)	● ¹⁾	◐ ³⁾	●
A4 3-Finger-Parallel ($h_{Obj} > 20$ mm)	●	●	●
A2 3-Finger-Zentrisch ($d_{Obj} > 60$) ³⁾	● ¹⁾	◐ ³⁾	●
A7 2-Finger ($d_{Obj}, l_{Obj} > 10$ mm) ³⁾	●	●	●
A15 Einfache Anbindung	◐	●	●
A13 Echtzeitfähigkeit	◐	●	◐
A16 Niedrige Komplexität	○	●	●
A14 Schnelle Planbarkeit	○	●	●
A12 Spannungsversorgung 24 V	●	●	●
A8 Umgebungstemp. 15 bis 30 °C	●	●	●
A6 Schutzklasse IP65	◐	●	◐

Legende: ● Voll erfüllt ◐ Teilweise erfüllt ○ Unzureichend erfüllt

¹⁾ Abhängig von der Geometrie und dem Material der Fingerspitzen
²⁾ Abhängig von der Anzahl der Fingerglieder
³⁾ Abhängig vom Abstand der Bänder bzw. der Maschenweite

Abbildung 4-8: Bewertung der Gesamtsystemvarianten anhand der Anforderungen aus Kapitel 3.9.2

Variante 1 ist bzgl. des Greifspektrums und der Sicherheit des Griffes hoch bewertet. Variante 2 besitzt hervorragende Eigenschaften bzgl. des mechanischen Designs in Bezug auf Robustheit und Einfachheit sowie der niedrigen steuerungstechnischen Komplexität. Diesen Eigenschaften entgegen wirkt eine schlechtere Bewertung hinsichtlich des erfassbaren Greifspektrums. Variante 3 bietet gegenüber diesen beiden Extremen einen guten Kompromiss, der alle relevanten Aspekte gleichermaßen bedient.

5 Theoretische Untersuchung einer n-gliedrigen, selbstadaptiven Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt hinsichtlich ihrer Greifmöglichkeiten

5.1 Prinzipieller Ablauf eines Greifvorganges

Der Ablauf des Greifvorganges lässt sich durch zwei Zustände beschreiben, den Bewegungszustand und den Gleichgewichtszustand. Der Bewegungszustand beschreibt das Verhalten der Kinematik vom Beginn des Kontaktes mit dem Greifobjekt bis zum Stillstand des Fingersystems, dem Gleichgewichtszustand. Während des Bewegungszustandes wird das Greifobjekt, je nach Position des ersten Kontaktes innerhalb der Kinematik durch die einzelnen Glieder parallel zum Finger bewegt.

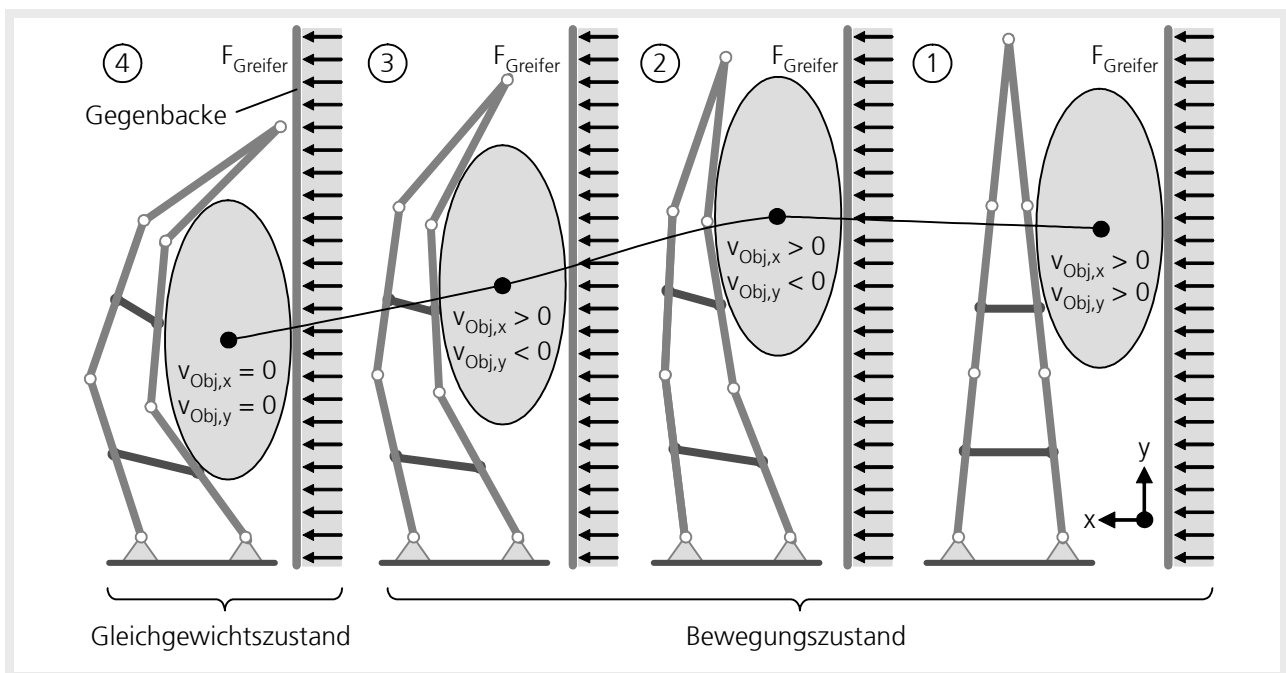


Abbildung 5-1: Prinzipieller Ablauf eines Greifvorganges

Je nach Anzahl der Glieder, deren geometrische Zusammenhänge und der Größe des Greifobjektes kann sich dieser „Schwingvorgang“ mehrere Male wiederholen, bis sich ein stationärer Gleichgewichtszustand einstellt. Die genauen Zusammenhänge bzgl. der Umschlingung des Objektes und der wirkenden Kräfte im Gleichgewichtszustand werden im Folgenden theoretisch und mittels Bewegungssimulation untersucht.

5.2 Ermittlung, Klassifizierung und Eingrenzung der Einflussfaktoren auf eine n-gliedrige, selbstadaptive Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt

Die Bewegung der Fingerkinematik und die auf das Greifobjekt wirkenden Kräfte werden von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- Größe und Form des Greifobjektes in der Ebene des Griffes,
- Masse des Greifobjektes,
- Oberflächeneigenschaften des Greifobjektes, insbesondere der materialpaarungs-spezifische Reibkoeffizient,
- die Verformbarkeit des Greifobjektes aufgrund des spezifischen Elastizitätsmoduls des Materials,
- die vom Antriebssystem in die Fingerkinematik eingeleitete Greifkraft
- der aus der Fingerkonfiguration und der relativen Position des Greifers zum Greifobjekt resultierende Krafteinleitungspunkt,
- die aus der Fingerführung resultierende Krafteinleitungsrichtung,
- die Geschwindigkeit der Fingerkinematik im Bewegungszustand,
- die geometrische Konfiguration der Fingerkinematik bzgl. Anzahl der Fingerglieder, Länge der Fingerglieder und Abstand der Lagerpunkte an der Basis der Kinematik,
- die Eigenmasse der Kinematik,
- die Lagerung und damit die resultierenden Kraftverluste durch die Gelenkreibung,
- die Elastizität der Fingerkinematik und
- die Federkonstante der Rückstellelemente (Federn) zwischen den Gliedern.

In Abbildung 5-2 werden die Einflussfaktoren klassifiziert und zusammengefasst.

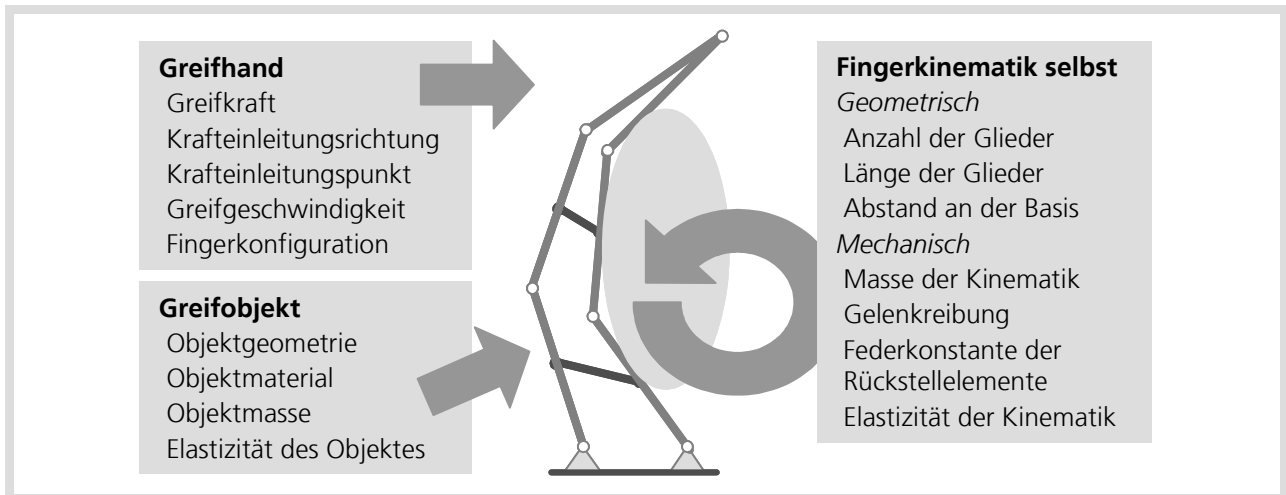


Abbildung 5-2: Einflussfaktoren auf eine n -gliedrige, selbstadaptive Kinematik nach dem Finray-Effekt

5.3 Entwicklung eines mechanischen Ersatzmodells für eine n -gliedrige, selbstadaptive Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt

Bei einer n -gliedrigen, selbstadaptiven Fingerkinematik handelt es sich um eine mehrfach geschlossene Kette, also eine parallele Kinematik. Die Kinematik besteht aus mehreren starren Körpern, die durch Gelenke miteinander verbunden sind. Beim Modell der Kinematik wird allerdings von starren masselosen Körpern ausgegangen, die durch reibfreie Gelenke miteinander verbunden sind. Die Glieder der vorderen und der hinteren Phalanx haben alle die gleiche Länge.

Zwischen den Gliedern werden Rückstellfedern benötigt, welche die Kinematik nach dem Griff in ihre Ruhestellung zurückbringen. Bis auf die Fingerspitze (Glieder N) besteht jedes Glied aus einer vorderen und einer hinteren Phalanx, die durch eine Querstrebe miteinander, ebenfalls über rotatorische, reibfreie Gelenke, verbunden sind. Die Fingerspitze wird vom darunter angeordneten Glied zwangsgeführt.

Abbildung 5-3 zeigt das mechanische Ersatzmodell für eine n -gliedrige, selbstadaptive Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt am Beispiel einer 3-gliedrigen Kinematik. Die Parameter des Modells wurden so gewählt, dass beliebig lange Kinematiken mit dem Modell beschrieben werden können.

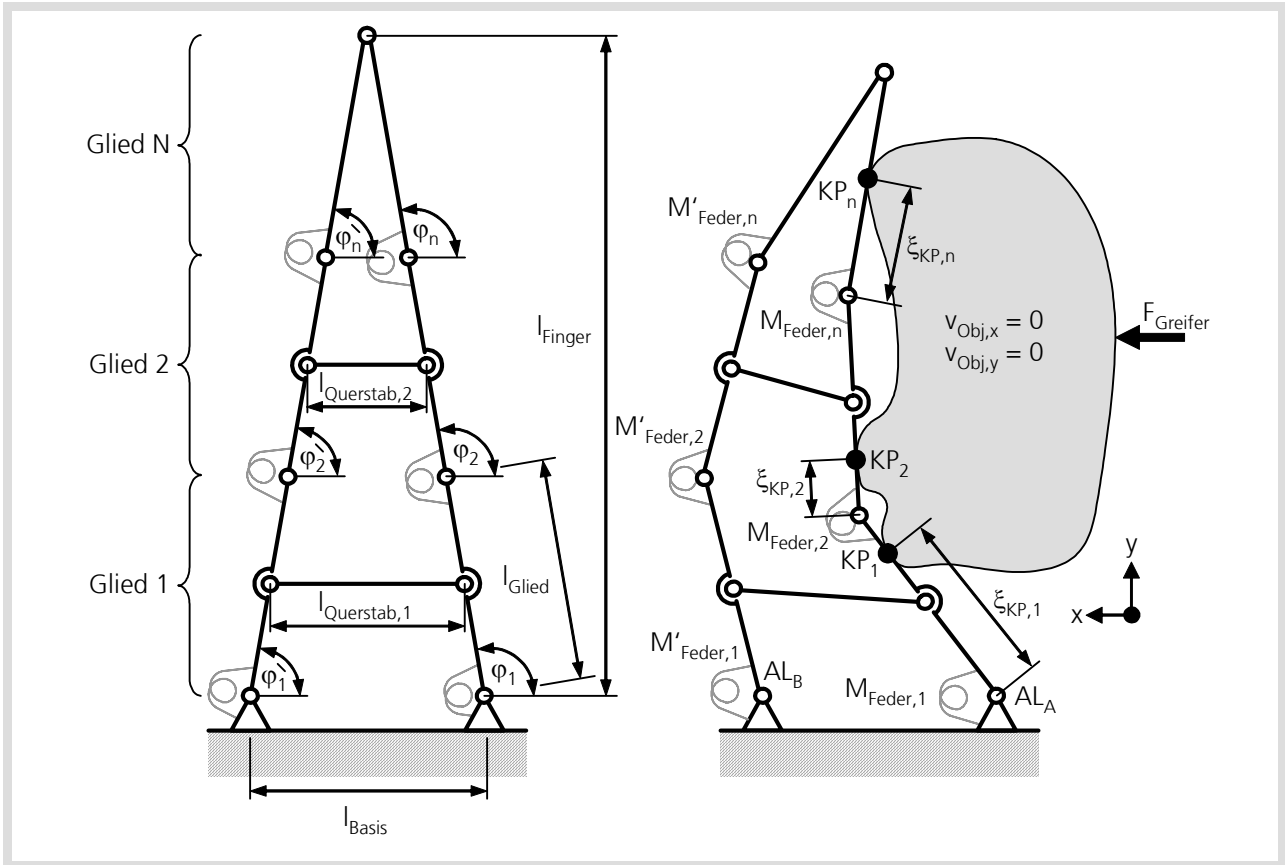


Abbildung 5-3: Mechanisches Ersatzmodell einer n-gliedrigen, selbstadaptiven Kinematik nach dem Finray-Effekt

5.4 Ermittlung der grundlegenden Zusammenhänge

5.4.1 Gesamtlänge, Länge der Querstreben und inertialer Winkel

Zur Bestimmung aller, für die Beschreibung des Fingers notwendigen Größen, müssen die drei folgenden Parameter bekannt sein:

- N_{Glieder} : Anzahl der Glieder der Kinematik
- l_{Glieder} : Die Länge der Glieder der Kinematik
- l_{Basis} : Der Abstand der Glieder an der Basis der Kinematik

Aus den oben beschriebenen Parametern lässt sich nun die Gesamtlänge, unter Verwendung des Satzes des Pythagoras, nach der Beziehung

$$l_{Finger} = \sqrt{(l_{Glieder} \cdot N_{Glieder})^2 - \frac{l_{Basis}^2}{4}} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

berechnen. Die Längen der einzelnen Querstreben ergeben sich, unter Verwendung des Strahlensatzes zu

$$l_{Querstab,i} = l_{Basis} \left(1 + \frac{\frac{1}{2} - i}{N_{Glieder}} \right). \quad \text{Gleichung 5-2}$$

Der inertielle Winkel ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$\varphi_{ini} = \pi - \arccos\left(\frac{l_{Basis}}{2 \cdot N_{Glieder} \cdot l_{Glieder}}\right) \quad \text{Gleichung 5-3}$$

5.4.2 Anzahl der Freiheitsgrade

In /Eberhard 2004/ wird zur Berechnung der Zahl der Lagefreiheitsgrade eines gebundenen mechanischen Systems der Zusammenhang

$$f = e - q \quad \text{Gleichung 5-4}$$

mit

$$e = \sum_{i=1}^p e_i \quad \text{Gleichung 5-5}$$

angegeben. Wobei p die Anzahl der Körper, e_i der Zahl der Freiheitsgrade der einzelnen Körper und q der Anzahl der Bindungen entspricht.

Für den, hier anwendbaren, ebenen Fall, reduziert sich die Zahl der Freiheitsgrade pro Körper auf zwei lineare und einen rotatorischen Freiheitsgrad. Die Anzahl der Bindungen wird z.B. für ein Gelenk mit 2 angegeben, da es ausschließlich eine rotatorische Bewegung der angeschlossenen Körper zulässt.

In Abbildung 5-4 sind drei Konfigurationen der Kinematik dargestellt. Im Fall von $N_{Glieder} = 2$ Gliedern existieren 5 Körper mit je 3 Freiheitsgraden und 7 Gelenke mit je 2 Bindungen. Nach Gleichung 5-4 berechnet sich hiermit die Zahl der Freiheitsgrade zu 1. Im Fall $N_{Glieder} = 3$ existieren 8 Körper und 11 Gelenke. Damit berechnet sich hiermit die Zahl der

Freiheitsgrade zu 2. Die Zahl der Freiheitsgrade in Fall $N_{\text{Glieder}} = 4$ berechnet sich mit 11 Körpern und 15 Gelenken zu 3.

N_{Glieder}	2	3	4
p: Anzahl Körper mit 3 Freiheitsgraden	5	8	11
q: Anzahl Gelenke mit 2 Bindungen	7	11	15
f: Anzahl Freiheitsgrade	1	2	3

Abbildung 5-4: Anzahl der Freiheitsgrade für unterschiedliche Konfigurationen der Kinematik

Es ist zu erkennen, dass die Zahl der Lagefreiheitsgrade linear mit der Anzahl der Querstreben oder gleichzeitig mit der Zahl N der Glieder steigt. Für die Anzahl der Lagefreiheitsgrade kann also allgemein der Zusammenhang

$$f_{\text{Finray}} = N_{\text{Glieder}} - 1 \quad \text{Gleichung 5-6}$$

angegeben werden. Die Anzahl der Körper der Kinematik kann nach der Beziehung

$$p = 2 N_{\text{Glieder}} + N_{\text{Glieder}} - 1 \quad \text{Gleichung 5-7}$$

berechnet werden.

5.4.3 Zusammenhang zwischen vorderer und hinterer Phalanx der Fingerkinematik

Vordere und hintere Phalanx der Fingerkinematik sind bei jedem Glied, außer der Fingerspitze, durch die entsprechenden Querstreben zwangsgekoppelt. Zur Berechnung des Winkels der hinteren Phalanx, die durch die Knoten K_i gekennzeichnet ist, wird die Hilfsdiagonale q eingeführt. Mit Hilfe des Satzes des Pythagoras und des Kosinussatzes kann der Winkel der hinteren Phalanx in Abhängigkeit der vorderen Phalanx berechnet werden. Abbildung 5-5 beschreibt den geometrischen Zusammenhang innerhalb eines Fingergliedes mit den entsprechenden Gleichungen vollständig.

Abbildung 5-7 (links) zeigt den Zusammenhang zwischen φ_1 und φ_1' für eine zweigliedrige Kinematik in Abhängigkeit der Gliedlänge l_{Glieder} für $l_{\text{Basis}} = 20 \text{ mm}$.

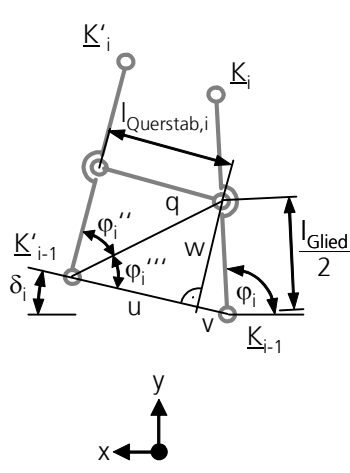
	$\delta_i = \arctan\left(\frac{K'_{i-1,y} - K_{i-1,y}}{ K'_{i-1,x} - K_{i-1,x} }\right)$	Gleichung 5-8
	$w = \frac{1}{2} \cdot l_{Glieder} \cdot \sin(\pi - \varphi_i - \delta_i)$	Gleichung 5-9
	$v = \frac{1}{2} \cdot l_{Glieder} \cdot \cos(\pi - \varphi_i - \delta_i)$	Gleichung 5-10
	$u = \overline{K'_{i-1} K_{i-1}} - v$	Gleichung 5-11
	$q = \sqrt{u^2 + w^2}$	Gleichung 5-12
	$\varphi_i'' = \arccos\left(\frac{\frac{1}{4} \cdot l_{Glieder}^2 + q^2 - l_{Querstab,i}^2}{l_{Glieder} \cdot q}\right)$	Gleichung 5-13
	$\varphi_i''' = \arccos\left(\frac{q^2 + (u+v)^2 - \frac{1}{4} \cdot l_{Glieder}^2}{2 \cdot q \cdot (u+v)}\right)$	Gleichung 5-14
$\varphi_i' = \varphi_i'' + \varphi_i''' - \delta_i$	Gleichung 5-15	

Abbildung 5-5: Geometrische Zusammenhänge zwischen vorderer und hinterer Phalanx eines Fingergliedes

5.4.4 Zwangsführung der Fingerspitze

Die Fingerspitze verfügt über keine Querstrebe und wird vom vorletzten Glied der Kinematik zwangsgeführt. Die Position der Fingerspitze kann aus den oberen Knoten des vorletzten Gliedes wie in Abbildung 5-6 dargestellt berechnet werden.

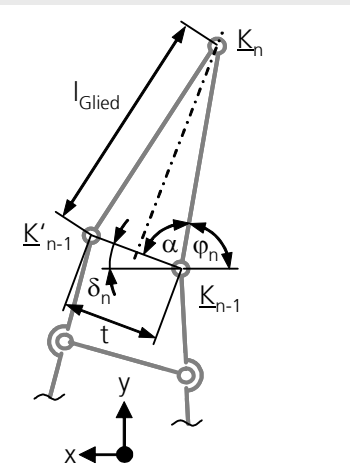
	$\delta_n = \arctan\left(\frac{K'_{n-1,y} - K_{n-1,y}}{ K'_{n-1,x} - K_{n-1,x} }\right)$	Gleichung 5-16
	$t = \sqrt{(K'_{n-1,y} - K_{n-1,y})^2 + (K'_{n-1,x} - K_{n-1,x})^2}$	Gleichung 5-17
	$\alpha = \arccos\left(\frac{t}{2 \cdot l_{Glieder}}\right)$	Gleichung 5-18
	$\varphi_n = \pi - \delta_n - \alpha$	Gleichung 5-19
	$\varphi_n' = \alpha - \delta_n$	Gleichung 5-20

Abbildung 5-6: Zwangsführung der Fingerspitze

Daraus ergibt sich der in Abbildung 5-7 (rechts) dargestellte Zusammenhang zwischen φ_1 und φ_n an der Fingerspitze für eine zweigliedrige Kinematik in Abhängigkeit der Gliedlänge l_{Glied} für einen Basisabstand von $l_{\text{Basis}} = 20$ mm.

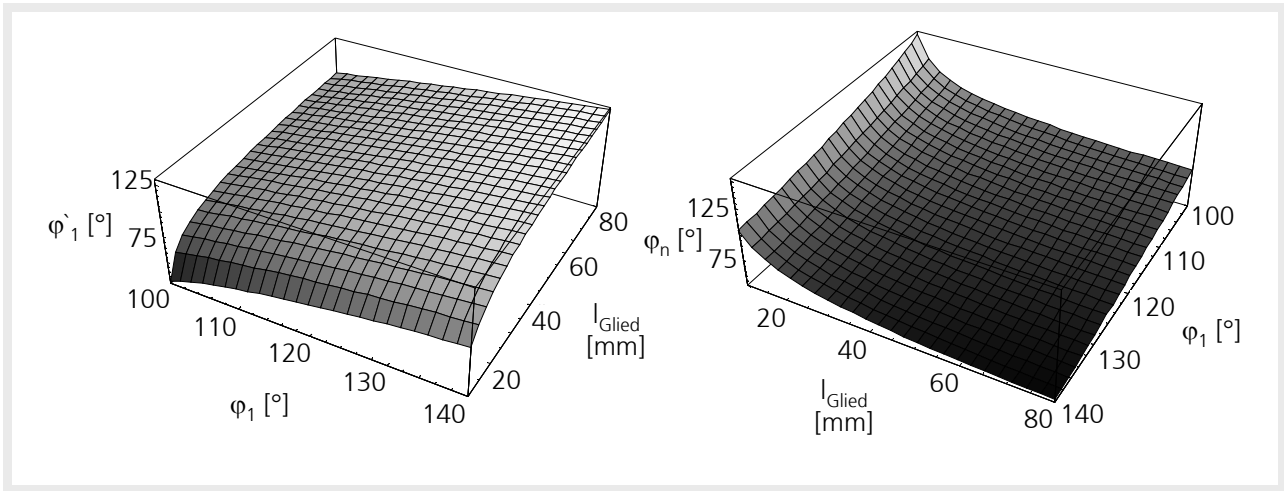


Abbildung 5-7: Links: Zusammenhang zwischen vorderem und hinterem Gliedwinkel für eine zweigliedrige Kinematik in Abhängigkeit der Gliedlänge für einen Basisabstand von 20 mm. Rechts: Zusammenhang zwischen unterem und oberem Gliedwinkel an der Fingerspitze für eine zweigliedrige Kinematik in Abhängigkeit der Gliedlänge für einen Basisabstand von 20 mm

Aus Abbildung 5-7 (links) ist zu erkennen, dass bei größer werdender Gliedlänge der Zusammenhang zwischen φ_1 und φ'_1 zunehmend linearer wird und das Verhältnis der Steigungen von $\Delta\varphi_1$ und $\Delta\varphi'_1$ immer kleiner, d.h., dass die Differenz zwischen y-Koordinate der hinteren Phalanx zur y-Koordinate der vorderen Phalanx kleiner wird, was zu einem kleiner Winkel φ_{i+1} am $i+1$ -ten Gliedes führt. Damit nimmt die mögliche Umschlingung des Objektes unabhängig von dessen Abmessungen ab. Die größten Umschlingungen sind demnach für Gliedlängen kleiner als der Abstand an der Basis der Kinematik zu erreichen.

Wie Abbildung 5-7 (rechts) zeigt, lässt sich dieser Zusammenhang auch für die Fingerspitze angeben. Bei größer werdender Gliedlänge, in Bezug auf den Abstand an der Fingerbasis, wird der Winkel zwischen der hinteren und der vorderen Phalanx der Fingerspitze größer, was zu einer geringeren Umschlingung des Greifobjektes führt.

5.4.5 Kollisionsbetrachtung zur selbstadaptiven Fingerkinematik

Die Bewegung der Fingerglieder wird durch eine mögliche Kollision zwischen vorderer Phalanx und hinterer Phalanx oder zwischen vorderer Phalanx und Querstrebe beschränkt.

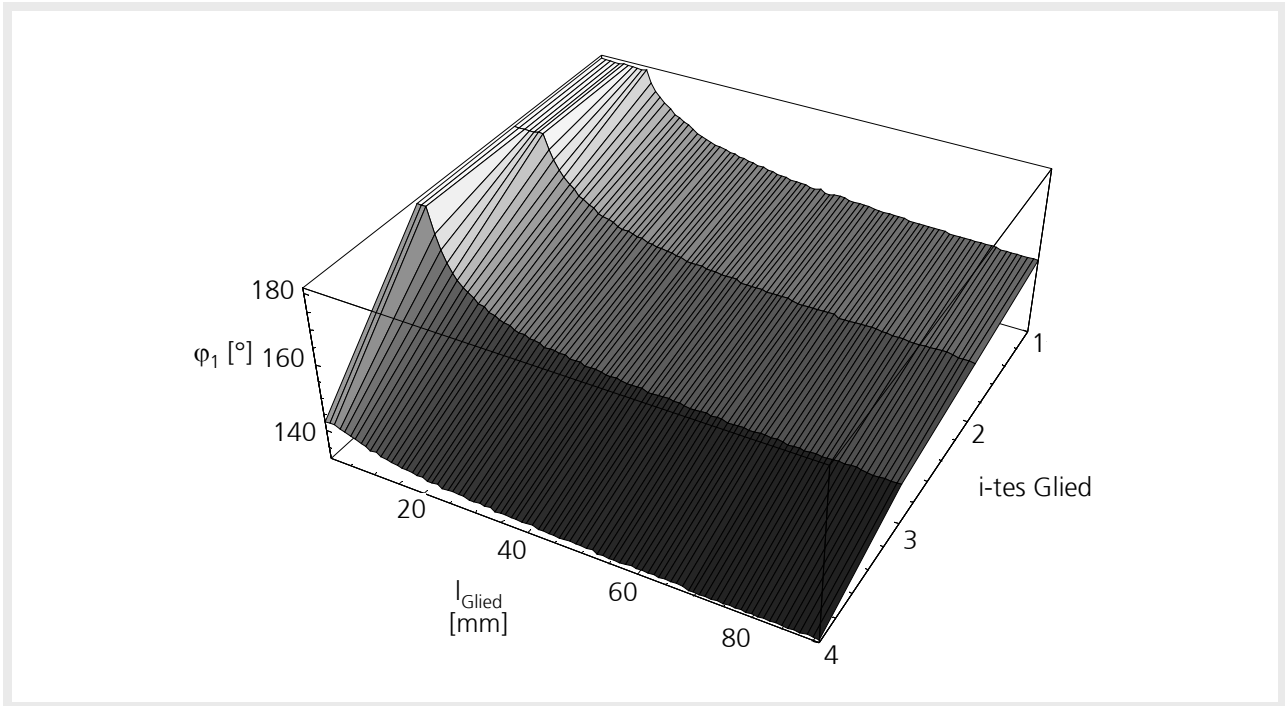


Abbildung 5-8: Kollisionsbetrachtung der einzelnen Glieder einer fünfgliedrigen Fingerkinematik in Abhängigkeit von der Gliedlänge

Kollisionen mit der Querstrebe können konstruktiv vermieden werden, indem sie außerhalb der Bewegungsräume der beiden Phalangen montiert werden. Abbildung 5-8 zeigt die maximalen Winkel einer fünfgliedrigen Fingerkinematik für einen festen Basisabstand von $l_{Basis} = 20 \text{ mm}$ für unterschiedliche Gliedlängen an den einzelnen Gliedern. Das in der Abbildung zu sehende Plateau bei einem Winkel von 180° kommt für Gliedlängen kleiner als der horizontale Abstand der $i-1$ -ten Knoten zustande, für Glied 1 entspricht dies dem Basisabstand ($l_{Basis} = 20 \text{ mm}$). Für steigende Gliedlängen und zunehmende Gliednummern nimmt der maximale Winkel ab, was wiederum zu einer geringeren Umschlingung führt.

Um eine optimale Umschlingung des Greifobjektes zu erreichen, sollte die Fingerkinematik also kleinere Gliedlängen als der Abstand an der Basis aufweisen und über möglichst wenige Glieder verfügen. Dies steht im Gegensatz zu einer gewünschten Erhöhung der Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Kinematik und Greifobjekt. Weiterhin führt dies zu kleinen Kinematiken und damit zu einem eingeschränkten Greifraum der nur durch eine Erhöhung des Basisabstandes zu kompensieren wäre. Dies wiederum führt zu breiten und sperrigen Kinematiken. In der Praxis muss also ein geeigneter Kompromiss zwischen dem Grad der Umschlingung, der Anzahl der Kontaktpunkte und der Baugröße der Kinematik gefunden werden.

5.4.6 Berechnung der Lagerreaktionen und der Kontaktkräfte in den einzelnen Gliedern

Zur Berechnung der Lagerreaktionen und der Kontaktkräfte wird die Kinematik wie in Abbildung 5-9 dargestellt frei geschnitten. Beim Freischneiden werden die vordere und die hintere Phalanx aufgetrennt.

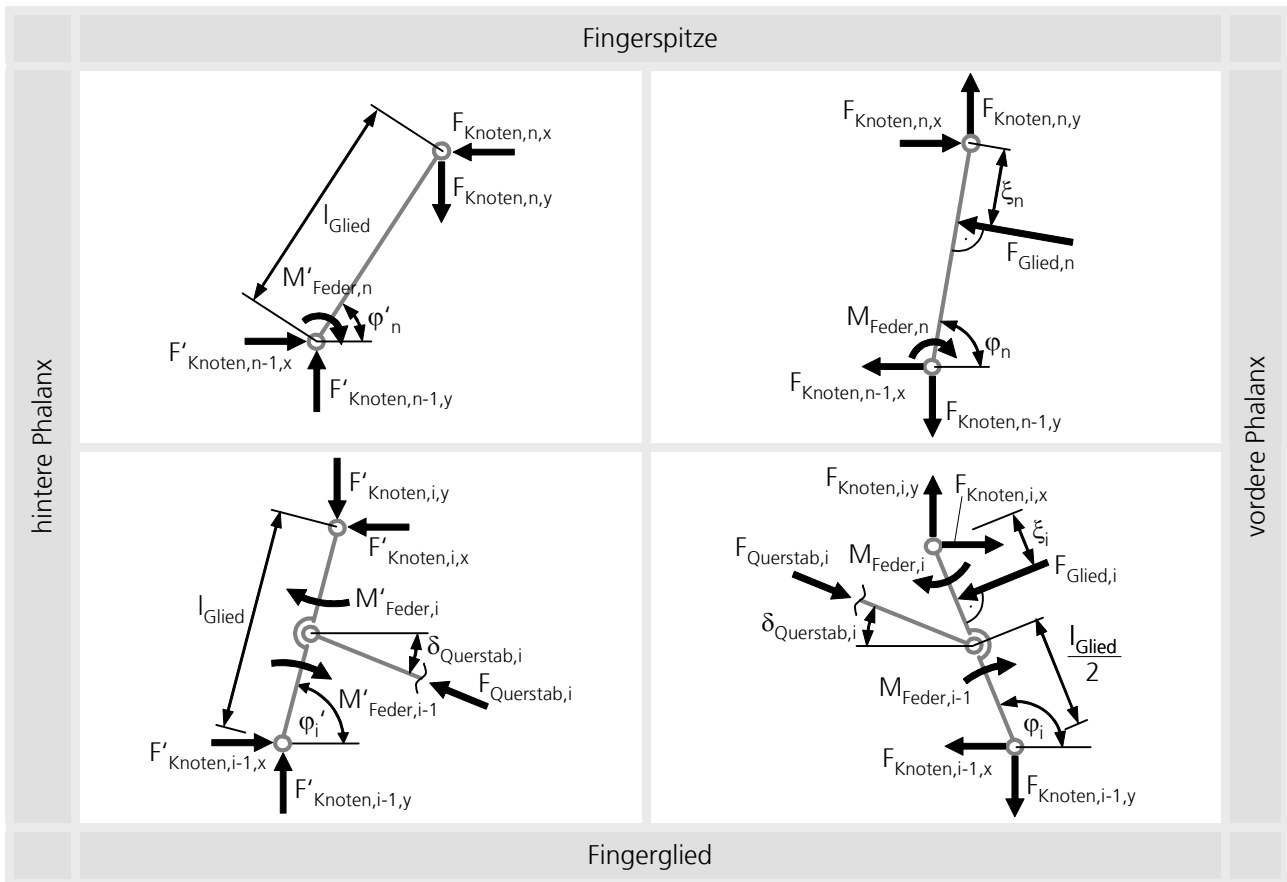


Abbildung 5-9: Kräfte am frei geschnittenen Fingerglied sowie an der Fingerspitze.

Weiterhin muss zwischen Fingerspitze und Fingerglied unterschieden werden. Das Freikörperbild ist für jedes Fingerlied einer n-gliedrigen Kinematik gleich, was eine algorithmische Berechnung der Kräfte ermöglicht.

Für die Fingerspitze erhalten wir drei Gleichungen für die vordere und drei Gleichungen für die hintere Phalanx. Insgesamt existieren aber, inklusive der Kontaktkraft F_{Objekt} , sieben unbekannte Kräfte. Für die Berechnung der Kontaktkräfte an der Kinematik wird zunächst ein Startwert angenommen. Der tatsächliche Wert der Kontaktkraft an der Fingerspitze wird später iterativ gelöst. Die Kraft- und Momentbilanzen an der Fingerspitze liefern das folgende Gleichungssystem mit sechs Gleichungen und sechs Unbekannten:

Die Summe der Kräfte in x-Richtung

$$-F_{Knoten,n-1,x} + F_{Knoten,n,x} = F_{Glieder,n} \cdot \sin \varphi_n \quad \text{Gleichung 5-21}$$

die Summe der Kräfte in y-Richtung

$$-F_{Knoten,n-1,y} + F_{Knoten,n,y} = F_{Glieder,n} \cdot \cos \varphi_n \quad \text{Gleichung 5-22}$$

und die Momentbilanz um den oberen Punkt

$$F_{Knoten,n-1,x} \cdot \sin \varphi_n \cdot l_{Glieder} - F_{Knoten,n-1,y} \cdot \cos \varphi_n \cdot l_{Glieder} = -F_{Glieder,n} \cdot \xi_n - M_{Feder,n} \quad \text{Gleichung 5-23}$$

für die vordere Phalanx sowie analog

$$F'_{Knoten,n-1,x} - F_{Knoten,n,x} = 0 \quad \text{Gleichung 5-24}$$

$$F'_{Knoten,n-1,y} - F_{Knoten,n,y} = 0 \quad \text{Gleichung 5-25}$$

und

$$-F'_{Knoten,n-1,x} \cdot \sin \varphi'_n \cdot l_{Glieder} - F'_{Knoten,n-1,y} \cdot \cos \varphi'_n \cdot l_{Glieder} = -M'_{Feder,n} \quad \text{Gleichung 5-26}$$

für die hintere Phalanx.

Für die hintere und vordere Phalanx des Fingergliedes ergeben sich ebenfalls je drei Gleichungen. Da die Kräfte an den oberen Gelenken des Fingergliedes aus der Berechnung der Kräfte an der Fingerspitze bekannt sind, reduziert sich die Zahl der Unbekannten am Fingerglied auf sechs, was der Anzahl der verfügbaren Gleichungen entspricht. Die Kraft- und Momentbilanzen am Fingerglied liefern das folgende Gleichungssystem:

Die Summe der Kräfte in x-Richtung

$$F'_{Knoten,i-1,x} + F_{Querstab,i} \cdot \cos \delta_{Querstab,i} = F'_{Knoten,i,x} \quad \text{Gleichung 5-27}$$

die Summe der Kräfte in y-Richtung

$$F'_{Knoten,i-1,y} - F_{Querstab,i} \cdot \sin \delta_{Querstab,i} = F'_{Knoten,i,y} \quad \text{Gleichung 5-28}$$

und die Momentbilanz um den Angriffspunkt des Querstabes

$$F_{\text{Querstab},i} \cdot \cos\left(\delta_{\text{Querstab},i} - \frac{3}{2}\pi - \varphi_i\right) \cdot \frac{l_{\text{Glieder}}}{2} =$$

$$-M'_{\text{Feder},i-1} - M'_{\text{Feder},i} + F'_{\text{Knoten},i,x} \cdot \sin \varphi'_i \cdot l_{\text{Glieder}} - F'_{\text{Knoten},i,y} \cdot \cos \varphi'_i \cdot l_{\text{Glieder}}$$

Gleichung 5-29

für die hintere Phalanx sowie analog für die vordere Phalanx

$$-F_{\text{Knoten},i-1,x} - F_{\text{Querstab},i} \cdot \cos \delta_{\text{Querstab},i} - F_{\text{Glieder},i} \cdot \sin \varphi_i = -F_{\text{Knoten},i,x}$$

Gleichung 5-30

$$-F_{\text{Knoten},i-1,y} - F_{\text{Querstab},i} \cdot \sin \delta_{\text{Querstab},i} + F_{\text{Glieder},i} \cdot \cos \varphi_i = -F_{\text{Knoten},i,y}$$

Gleichung 5-31

und

$$-F_{\text{Querstab},i} \cdot \cos\left(\delta_{\text{Querstab},i} - \frac{3}{2}\pi - \varphi_i\right) \cdot \frac{l_{\text{Glieder}}}{2} - F_{\text{Glieder},i} \cdot (l_{\text{Glieder}} - \xi_i) =$$

$$-M_{\text{Feder},i-1} - M_{\text{Feder},i} - F_{\text{Feder},i,x} \cdot \sin \varphi_i \cdot l_{\text{Glieder}} - F_{\text{Knoten},i,y} \cdot \cos \varphi_i \cdot l_{\text{Glieder}}$$

Gleichung 5-32

Um die tatsächliche Kontaktkraft an der Fingerspitze iterativ bestimmen zu können, müssen die Kontaktkräfte noch der Bedingung

$$\sum_{i=1}^N F_{\text{Glieder},i,x} = F_{\text{Greifer}}$$

Gleichung 5-33

folgen.

Die Gleichungssysteme lassen sich mit gängigen Mathematikprogrammen sowohl numerisch als auch symbolisch lösen. Auf die Angabe der symbolischen Lösungen wird aufgrund mangelnder Übersichtlichkeit der Lösungen verzichtet. Alle weiteren Berechnungen basieren auf numerischen Lösungen, die mittels des Gaußschen Eliminationsverfahrens bestimmt wurden.

Damit sind alle notwendigen Beziehungen zur Berechnung der einzelnen Kontaktkräfte zwischen Kinematik und Greifobjekt, ohne Einschränkung der Allgemeinheit, für n-gliedrige Fingerkinematiken nach dem Finray-Effekt hergeleitet.

5.5 Simulation der Greifbewegung einer n-gliedrigen, selbstadaptiven Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt

5.5.1 Aufbau der Simulationsumgebung

Die Simulation wird mit dem CAD-Programm SolidWorks durchgeführt. Zur Bewegungssimulation bietet SolidWorks den Bewegungssimulator ADAMS als integriertes Modul. Die Kinematik wird als 3D-Volumenmodell ohne die Rückstellfedern zwischen den Gelenken modelliert. Parallel zur Fingerkinematik wird eine Gegenbacke modelliert, die das, ebenfalls als Volumenmodell modellierte Greifobjekt an die Kinematik drückt.

5.5.2 Betrachtung des Bewegungszustandes

Das Greifobjekt führt während des Greifvorganges eine schwingende Bewegung aus. Aufgrund der Schräge der vorderen Phalanx ist die erste Bewegung des Objektes stets nach oben gerichtet (Abbildung 5-10).

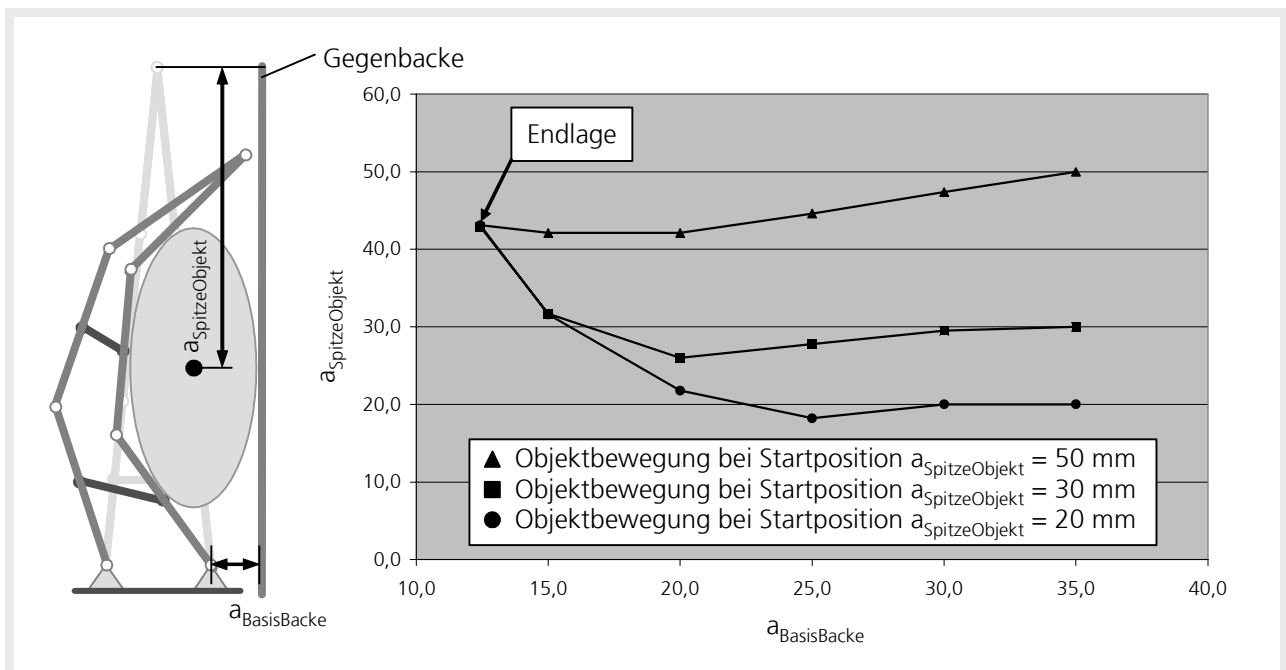


Abbildung 5-10: Vertikale Position des Greifobjektes während des Bewegungszustandes in Abhängigkeit der Greifwege zwischen Fingerkinematik und Gegenbacke

5.5.3 Betrachtung des Gleichgewichtszustandes

Die Simulation wird mit unterschiedlichen Parametern für Gliedlänge und Basisabstand für eine 4-gliedrige Kinematik mit unterschiedlichen Objektgeometrien und Objektmaßen durchgeführt.

Abbildung 5-11 zeigt Kinematiken, bei denen die Gliedlänge kürzer ist als das Abmaß des Objektes. Die schwarzen Punkte kennzeichnen die Startpositionen der Objekte vor dem Kontakt mit der Kinematik, der helle Punkt kennzeichnet die Endposition.

Abbildung 5-12 sowie Abbildung 5-13 zeigen weitere Simulationsergebnisse, bei denen die Parameter der Kinematik in Bezug auf die Gliedlänge und den Basisabstand geändert wurden. Neben Regelgeometrien wie Quader oder Zylinder wurden auch asymmetrische Objekte untersucht.

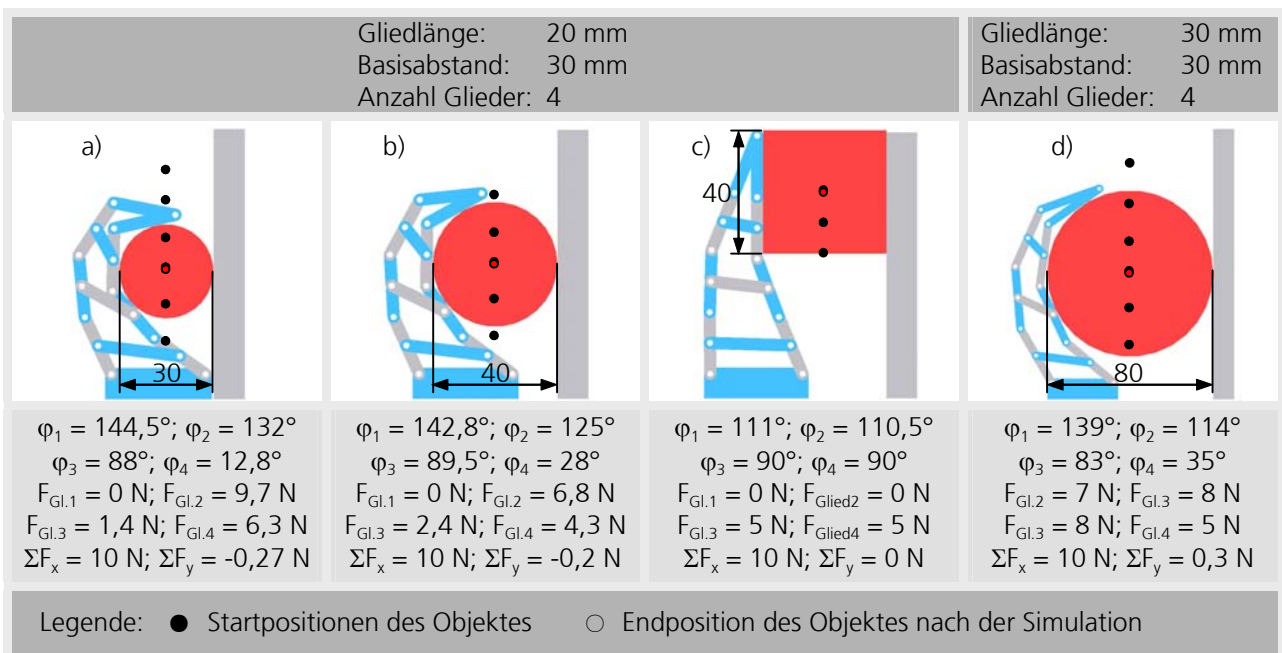


Abbildung 5-11: Simulationsergebnisse der Bewegungssimulation von unterschiedlichen Objektformen und Objektdurchmessern mit Kinematiken mit unterschiedlichen Parametern

Es ist zu sehen, welche Endlagen unterschiedliche Objektgeometrien nach einem Griff einnehmen. Anhand der schwarzen und hellen Punkte ist zu erkennen, dass für unterschiedliche Anfangspositionen der Objekte vor der Greifbewegung jeweils nur eine Endlage existiert.

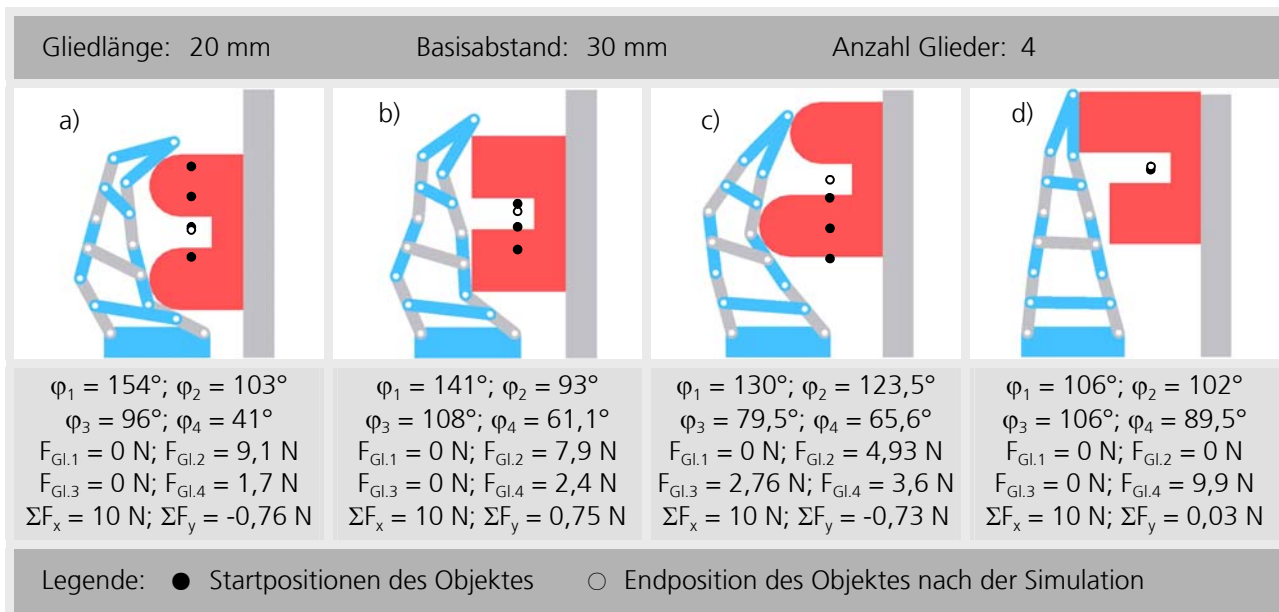


Abbildung 5-12: Simulationsergebnisse der Bewegungssimulation von unterschiedlichen Objektformen und Objektdurchmessern

Für die jeweiligen Endlagen wurden mittels der in Kapitel 5.4.6 hergeleiteten Formeln die Kräfte in den Fingergliedern sowie die Summe der Kräfte in y-Richtung bei einer vorgegebenen Greifkraft von 10 N ermittelt. Es ist zu erkennen, dass die resultierenden Kräfte orthogonal zur Greifrichtung nahezu verschwinden.

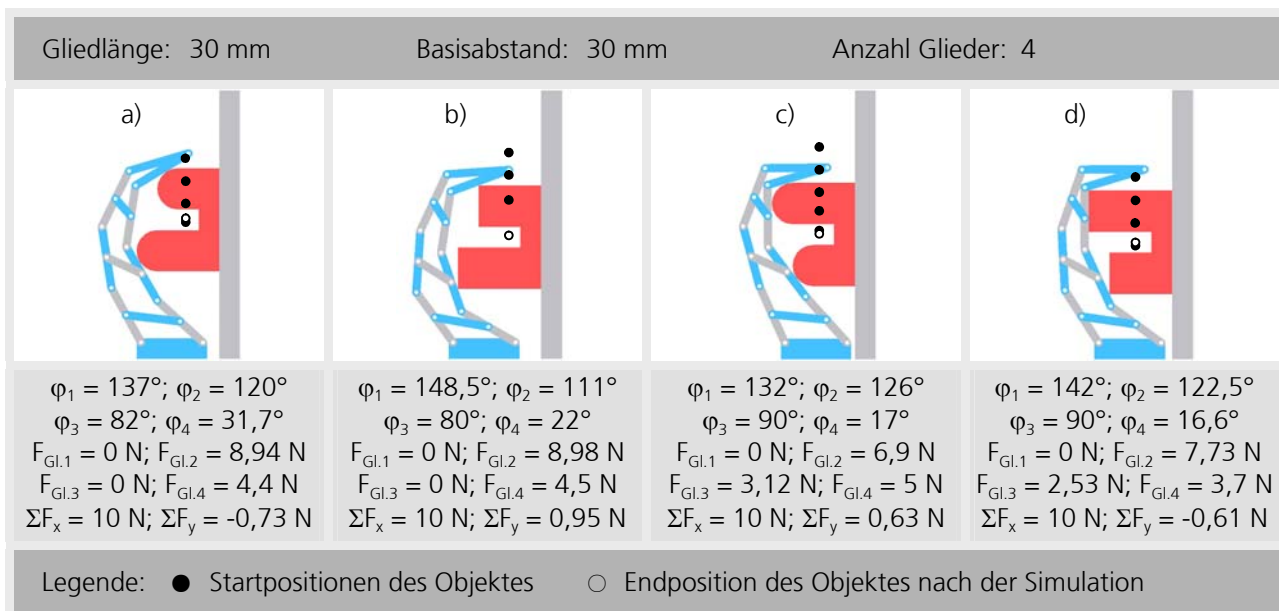


Abbildung 5-13: Simulationsergebnisse der Bewegungssimulation von unterschiedlichen Objektformen und Objektdurchmessern

5.5.4 Folgerungen aus den Simulationsergebnissen

Die nachstehenden Folgerungen können aufgrund der Beobachtungen der Simulationsabläufe und der Simulationsergebnisse abgeleitet werden:

- Die Kinematik ist selbst optimierend, d.h. es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, an dem die Summe aller Kräfte orthogonal zur Greifrichtung Null wird.
- Nicht berührte Glieder, unterhalb des ersten Kontaktpunktes nehmen den Winkel des Gliedes ein, an dem der erste Kontakt stattfindet.
- Nicht berührte Glieder oberhalb des ersten Kontaktpunktes am Glied i nehmen einen Winkel $\alpha = \varphi_{ini} - \delta_i$ ein.
- Für unterschiedliche Anfangspositionen des Objektes resultiert nur eine Endposition.

5.6 Folgerungen aus der theoretischen Untersuchung der Fingerkinematik

Die Entwicklung und Modellierung des Finray-Effektes in eine mehrgliedrige selbstadaptive Fingerkinematik für Greifaufgaben haben die theoretischen Grundlagen zur Anwendung der Fingerkinematik gelegt. Bei der Modellbildung und den daraus entwickelten Rechenverfahren wurde auf einen allgemein gültigen Ansatz geachtet.

Die durchgeführten Bewegungssimulationen haben gezeigt, dass die Fingerkinematik unabhängig von der Form des Greifobjektes einen bzgl. der wirkenden Kontaktkräfte optimalen Griff liefert.

Auf Basis der Berechnungen und der Simulationsergebnisse lassen sich nun für unterschiedliche Szenarien selbstadaptive Fingerkinematiken auslegen und die resultierenden Kontaktkräfte voraussagen. Bei der Auslegung der Kinematik ist neben einer hohen Anzahl an Kontaktpunkten auf das Kollisionsverhalten der Kinematik zu achten.

Zur weiteren Steigerung der Anwendbarkeit der selbstadaptiven Fingerkinematik für Anwendungen im Bereich von Roboterassistenten im Haushaltsbereich muss ein Verfahren entwickelt werden, mit dem es möglich ist, resultierende Gliedwinkel in der Gleichgewichtslage der Fingerkinematik auf Basis von bildgebenden Sensorsystemen zu berechnen.

6 Entwicklung eines Iterations-Verfahren zur Berechnung der Gleichgewichtslage und der dort auftretenden Kontaktkräfte zwischen Fingerkinematik und Greifobjekt aus 3D-Sensordaten

6.1 Datenmodell für die zu greifenden Objekte

Roboterassistenten müssen, um mit ihrer Umwelt zu interagieren, über Sensoren zur Erfassung der Umwelt verfügen. Für Manipulationsaufgaben ist es wichtig, die Lage und Orientierung des zu handhabenden Objektes im Raum sowie dessen geometrische Gestalt und Größe zu kennen. Für solche Messaufgaben können bei bekannten Objekten Kameras eingesetzt werden. Die Auswertung der Bildinformationen erfolgt auf Basis von zuvor eingelernten Objekten durch Merkmalsvergleich.

Durch den Einsatz von Stereokamerasystemen können Tiefeninformationen gewonnen werden, die es erlauben, auch unbekannte, d.h. zuvor nicht eingelernte Objekte zu handhaben. Derzeitige Entwicklungslinien deuten allerdings in Richtung dreidimensionaler Entfernungssensoren, die mittels Laufzeitmessung eines gepulsten Laserstrahls Szenen vermessen können /Ledermann 2004/. Die Daten, die diese Sensorsysteme liefern, können allgemein als kartesische Punktwolken in der Form

$$P = \{x_i, y_i, z_i\}$$

Gleichung 6-1

angesehen werden. Durch geeignete Koordinatentransformationen lassen sich die Daten in beliebige Koordinatensysteme transformieren. Schnitte durch einen so dargestellten Körper lassen sich z.B. durch eine Extraktion aller x_i und y_i für konstante Werte von z_i bestimmen.

6.2 Abgrenzung zu Planungsverfahren zur Ermittlung von Fingerkonfigurationen

Ziel des zu entwickelnden Iterationsverfahrens ist nicht die Ermittlung einer Fingerkonfiguration des Greifsystems. Diese soll in einem vorgelagerten Planungsschritt ermittelt werden. Ziel dieses Verfahrens ist es, für eine vorgegebene Fingerkinematik und eine ebenfalls vorgegebene lineare Greifbewegung das Verhalten der Fingerkinematik

vorauszubestimmen, um daraus Aussagen zur Zulässigkeit des geplanten Griffes abzuleiten. Weiterhin lässt die ermittelte Gleichgewichtslage mit den in Kapitel 5.4.6 entwickelten Berechnungsvorschriften eine Vorhersage der entstehenden Kontaktkräfte zu.

6.3 Ermittlung der Startposition zwischen Fingerkinematik und Objekt

Wie in Kapitel 5.5 gezeigt wurde, ist die Startkonfiguration zwischen Kinematik und Objektpunkt unerheblich, da nur eine Endlage existiert. Aus greiftechnischen Gesichtspunkten kann jedoch anschaulich hergeleitet werden, dass, besonders für kleine Objekte, eine Startposition an der Fingerspitze am günstigsten ist weil in dieser Position die Gefahr von unerwünschten Kollisionen z.B. mit der Ablagefläche des Objektes minimal ist.

Aus diesen Überlegungen wird eine Startposition gewählt, bei der Fingerspitze und, aus Sicht des Greiferkoordinatensystems bei dem die positive x-Achse in Richtung der Finger zeigt, der entfernteste Objektpunkt übereinstimmen.

6.4 Iterationsverfahren zur Simulation der Greifbewegung

6.4.1 Ablauf der Iteration

Nach der Initialisierung von Kinematik und Objekt (vgl. mit Kapitel 6.3) beginnt die eigentliche Iteration. Die Abbruchbedingung für die äußere Schleife ist ein Wert von Null für die Summe der Kontaktkräfte in y-Richtung. Nach jeder Verschiebung des Objektes um Δx werden zwei innere Schleifen abgearbeitet.

Die erste innere Schleife prüft gliedweise, ob eine Kollision zwischen Kinematik und jedem der Objektpunkte vorliegt. Dabei wird der Reihe nach vom ersten bis zum n-ten Glied geprüft. Liegt eine Kollision vor, wird die Stellung der Glieder neu berechnet. Die Kinematik wird dabei so verschoben, dass das Kontaktglied sich vom Objekt wegbewegt. Dabei wird allerdings nicht sichergestellt, dass nach der Verschiebung keine Kollision mehr vorliegt.

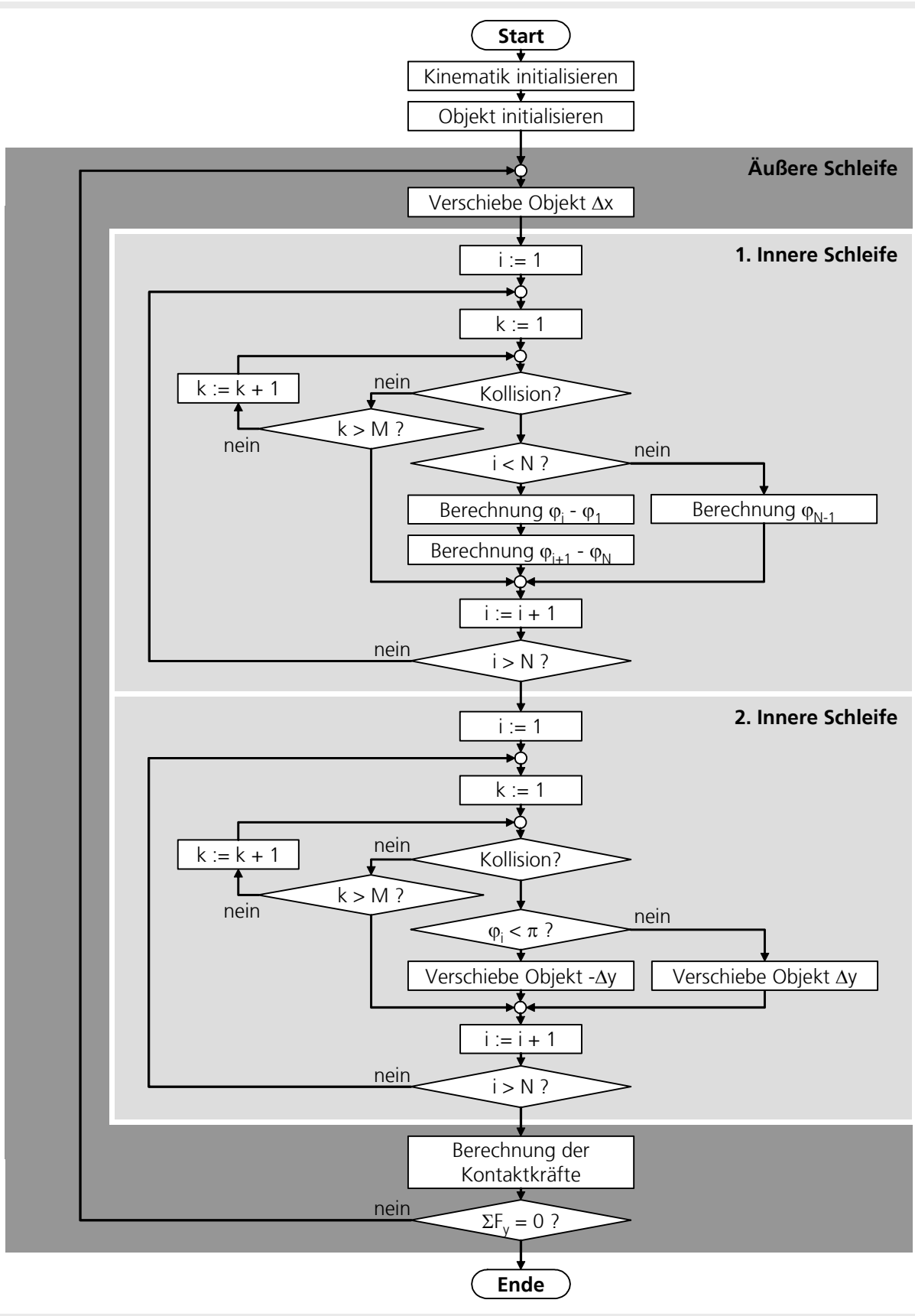


Abbildung 6-1: Ablauf der Iteration zur Berechnung der Gleichgewichtslage und der dort auftretenden Kontaktkräfte zwischen Fingerkinematik und Greifobjekt aus 3D-Sensordaten

Nach Abarbeitung der ersten inneren Schleife wird in der zweiten inneren Schleife die Kollisionsprüfung zwischen den Gliedern der Kinematik und den Objektpunkten wiederholt. Bei Auftreten einer Kollision wird in das Objekt vertikal um Δy verschoben. Die Verschieberichtung wird durch den Gliedwinkel bestimmt. Gliedwinkel kleiner als 90° bewirken eine negative, während Winkel größer oder gleich 90° eine positive Verschiebung zur Folge haben.

Der Ablauf der Iteration ist in Form eines Ablaufdiagramms in Abbildung 6-1 dargestellt.

6.4.2 Berechnung der Fingergliedwinkel

Die Verschiebung der Fingerkinematik, d.h. die neue Berechnung aller Winkel φ_i , basiert auf einer inkrementellen Verschiebung der Kinematik um den Winkel α_{Kipp} . Dabei werden die Winkel oberhalb des Kontaktpunktes zwischen Kinematik und Greifobjekt nach der Beziehung

$$\varphi_i = \varphi_{mi} - \delta_i \quad \text{Gleichung 6-2}$$

berechnet. Zur Berechnung der Winkel unterhalb des Kontaktpunktes werden zunächst die Hilfswinkel β_i berechnet. Für die Verschiebung der unteren Glieder müssen die entsprechenden β_i konstant bleiben. Die Verschiebung beginnt immer im Glied 1, welches um α_{Kipp} verschoben wird. Die restlichen Glieder bis zum Kontaktpunkt werden nach der Beziehung

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \beta_{i-1} - \pi \quad \text{Gleichung 6-3}$$

berechnet (siehe auch Abbildung 6-2).

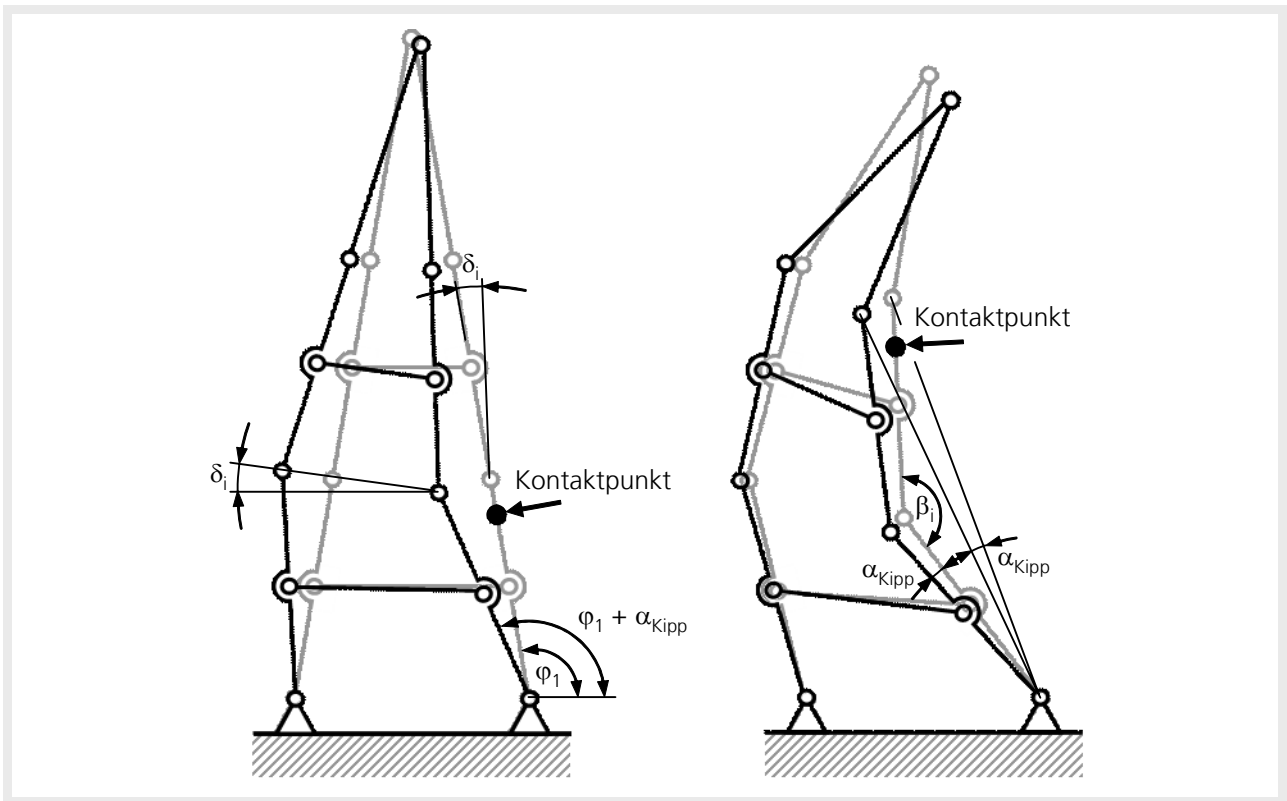


Abbildung 6-2: Verschieben der Fingerkinematik

6.5 Modellrechnung

Auf Basis der in Kapitel 5 hergeleiteten Grundlagen sowie mit dem in den vorherigen Abschnitten entwickelten Iterationsverfahren kann nun eine Simulation des Greifprozesses durchgeführt werden. Hierzu wurden die theoretischen Zusammenhänge sowie das Iterationsverfahren implementiert und anhand synthetisch generierter Objektdaten eine Modellrechnung durchgeführt.

Abbildung 6-3 zeigt Iterationsstufen sowie das Simulationsergebnis für eine dreigliedrige Fingerkinematik mit einem Basisabstand von 20 mm und einer Gliedlänge von 30 mm. Der Ablauf im rechten Teil des Bildes zeigt Momentaufnahmen während des ersten Kontaktes zwischen Greifobjekt und Kinematik, eine Situation in der das Greifobjekt sich in einer Abwärtsbewegung befindet und bereits zwei Kontaktpunkte aufweist sowie die Endlage von Kinematik und Greifobjekt.

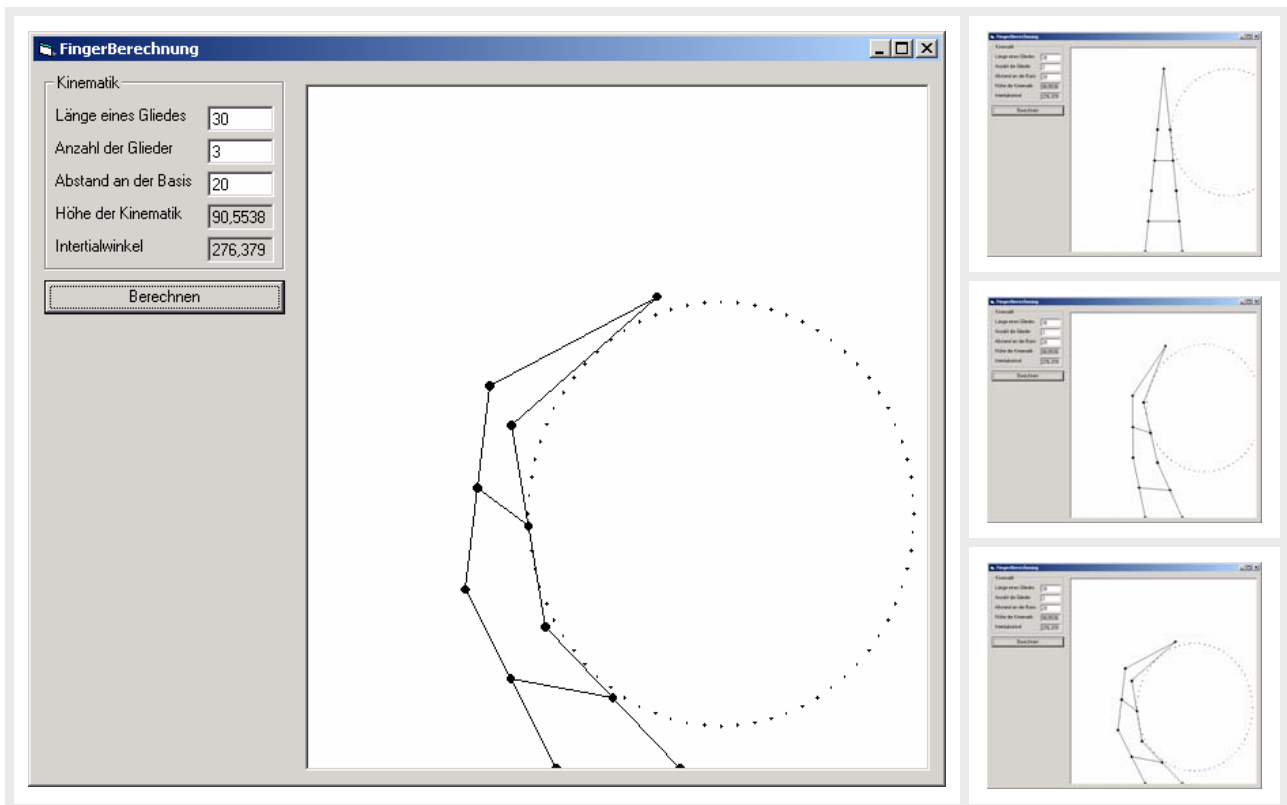


Abbildung 6-3: Ergebnis sowie Zwischenstufen der Iteration

6.6 Experimentelle Untersuchungen zur Verifikation des Iterationsverfahren zur Berechnung der Gleichgewichtslage und der dort auftretenden Kontaktkräfte zwischen Fingerkinematik und Greifobjekt aus 3D-Sensordaten

Um das Verfahren zu validieren, werden im Folgenden die realen Kräfte an der Kinematik gemessen und mit den auf Basis des Modells ermittelten Kräfte verglichen.

6.6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Kräfte an der Kinematik und am Objekt werden mit dem in Abbildung 6-4 dargestellten Versuchsaufbau gemessen. Der Finger besteht aus einer dreigliedrigen Kinematik mit einem Basisabstand von $l_{Basis} = 20 \text{ mm}$ und einer Gliedlänge von $l_{Glieder} = 30 \text{ mm}$. Der Finger ist auf einer Linearführung montiert. Über die Führung wirkt die Kinematik auf eine Kraftmessdose. Die Führung ist notwendig, um eine senkrechte Einleitung der Greifkraft in die Messdose zu gewährleisten. Die Fingerkinematik inklusive der Linearführung und der Kraftmessdose werden von einem Knickarmroboter positioniert. Der Roboter führt ebenfalls

die Greifbewegung aus. Der Einsatz eines Roboters ermöglicht eine präzise und wiederholgenaue Durchführung der Versuche.

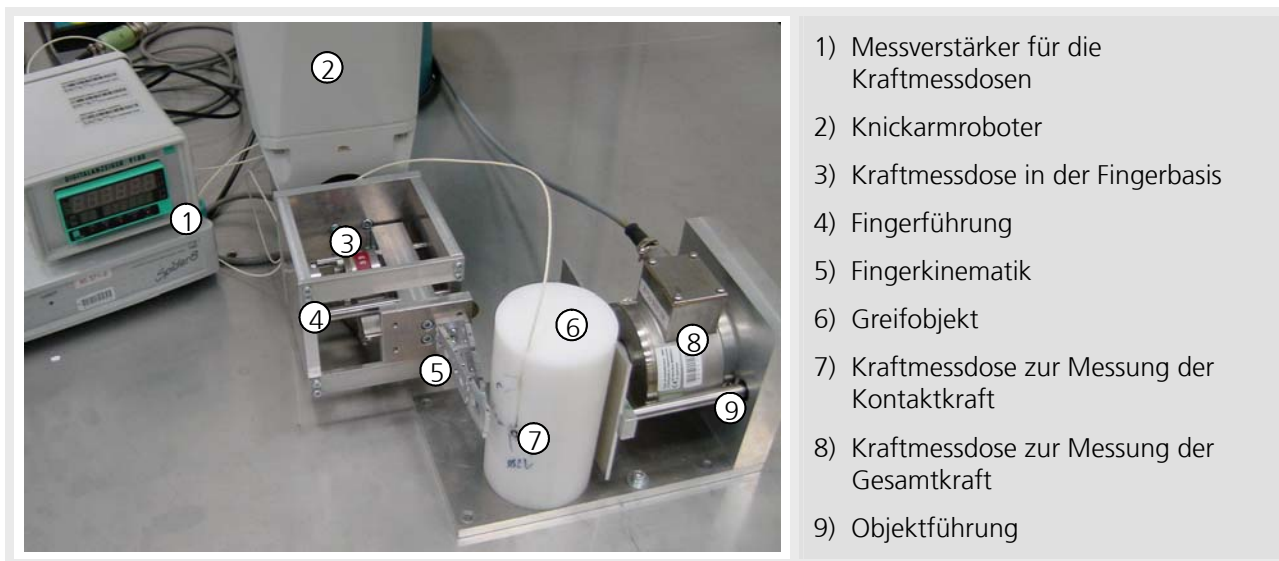


Abbildung 6-4: Versuchsaufbau zur Messung der Kontakt- sowie der Gesamtkräfte beim Greifen unterschiedlicher Objekte durch eine selbstadaptive Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt.

In Richtung der Greifbewegung des Fingers befindet sich ein Greifobjekt. Über eine weitere Linearführung wird mit einer weiteren Kraftmessdose die Gesamtkraft gemessen, die auf das Greifobjekt wirkt. Eine in das Greifobjekt integrierte Kraftmessdose (7) dient zur Messung der Kontaktkräfte zwischen Fingerkinematik und Greifobjekt. Die zwischen Greifobjekt und Unterlage wirkende Reibkraft kann vernachlässigt werden, da sie lediglich in der Bewegungsphase auftritt, in dieser Phase aber die Kontaktkräfte zwischen Fingerkinematik und Greifobjekt nicht von Interesse sind. Die Versuche werden mit unterschiedlichen Objektdurchmessern zwischen 50 und 82 mm durchgeführt.

6.6.2 Versuchsergebnisse

Ausgewählte Griffe für unterschiedliche Objektdurchmesser sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Aus den Bildern wurden die jeweiligen Gelenkwinkel bestimmt. Weiterhin wurden für unterschiedliche Glieder die Kontaktkräfte bestimmt.



Abbildung 6-5: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Kräften und Winkeln für drei unterschiedliche Objektdurchmesser

6.7 Folgerungen

Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten zeigt dass die Kraftberechnung tendenziell zu hohe Werte für die Kontaktkräfte und die Winkelberechnung tendenziell zu niedrige Werte liefert. Die Abweichungen bei den Kontaktkräften begründen sich auf ungenaue Messwerte die aus einer nicht exakten orthogonalen Krafteinleitung rühren. Die tendenziell zu niedrigen Winkelwerte entstehen da bei der Berechnung Elastizitäten und Fertigungstoleranzen in der Kinematik nicht berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die in Kapitel 5.3 gemachten Annahmen zulässig sind.

7 Realisierung und Verifizierung von Gesamtsystemvarianten

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der Konzepte sowie der Entwicklungen wurden zwei Gesamtsystemvarianten, die IPA-Hand I und die IPA-Hand II, aufgebaut und experimentell untersucht werden. Die IPA-Hand I fokussiert dabei auf die Umsetzung der Fingerkonfiguration während die IPA-Hand II auf die Greifmöglichkeiten bei der Integration einer selbstadaptiven Fingerkinematik nach dem Finray-Effekt abzielt.

7.1 Aufbau und Erprobung der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I



Abbildung 7-1: Gesamtsystemvariante IPA-Hand I

Die IPA-Hand I basiert auf der in Kapitel 4.2.1 konzipierten Fingeranordnungsvariante 5, bei der zwei Finger einem Daumen opponieren. Um den Ansprüchen bzgl. Wirtschaftlichkeit und niedriger steuerungstechnischer Komplexität gerecht zu werden, verfügt die Handkinematik der IPA-Hand I lediglich über zwei elektrische Antriebe.

Realisiert wird dies durch ein Getriebe, welches pro Finger zwei Bewegungen ermöglicht: Ein Öffnen und Schließen des Fingers in Richtung der Greifkraft und ein Verdrehen des Fingers um seine Hochachse. Abbildung 7-1 zeigt die IPA-Hand I an einem 6-Achs-Knickarm Roboter beim Handhaben unterschiedlicher Objektgeometrien.

7.1.1 Fingerkonfiguration

Jeder der beiden Finger ist über ein Kegelradgetriebe mit dem Motor verbunden. Das Kegelradgetriebe ermöglicht jedem Finger, in beliebiger Verdrehung um seine Hochachse, eine Greifbewegung auszuführen.

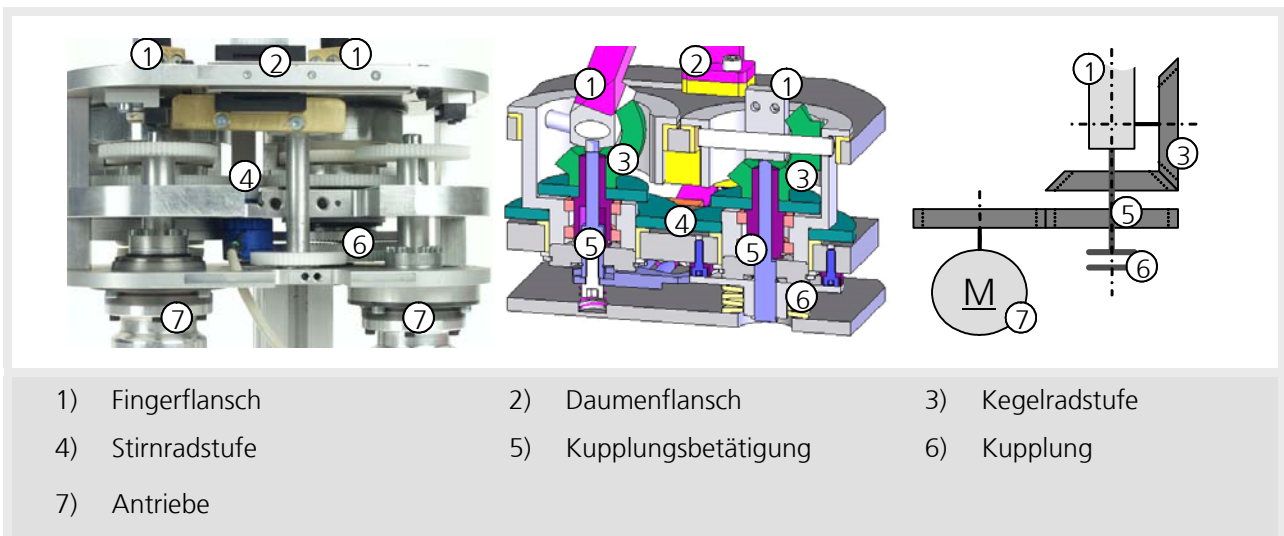


Abbildung 7-2: Fingerkonfiguration der IPA-Hand I

Jeder Finger ist also um seine Hochachse drehbar gelagert. Die Greifbewegung der Finger ist durch Anschläge begrenzt. Stößt Finger 1 gegen die Begrenzung, führt der Finger eine Drehung um seine Hochachse aus. Beim Öffnen des Fingers bewirkt dies eine Drehung im Uhrzeigersinn, beim Schließen des Fingers führt dieser eine Drehung entgegen des Uhrzeigersinns aus. Durch eine Kopplung der Drehbewegung mittels Kegelradstufe wird die Drehbewegung des Fingers 1 auf die des Fingers 2 übertragen.

Die oben beschriebene Lagerung der Finger führt dazu, dass beim Greifen eines Objektes die Greifkraft in eine rotatorische Bewegung umgesetzt wird. Um dies zu verhindern, muss jeder Finger während der Greifbewegung arretiert werden. In der hier umgesetzten Gesamtsystemvariante geschieht dies durch Kupplungen, die über Excenter in den Endlagen der Finger angesteuert werden. Die Excenter befinden sich an der Fingerbasis und betätigen in den beiden Endlagen der Greifbewegung eine Kupplung.

Die Kupplung des Fingers 1 bewirkt die beschriebene Arretierung. Die Kupplung des Fingers 2 stellt die Verbindung zum Daumengetriebe her. Wird diese Kupplung betätigt, d.h. Finger 2 befindet sich in der hinteren Endlage und über Finger 1 wird eine Rotation der Finger eingeleitet, verschiebt sich der Daumen in seine jeweils andere Position.

7.1.2 Antriebsauslegung

Die Antriebsauslegung erfolgt auf Basis der in Kapitel 3.9 zusammengefassten Anforderungen. Die Auslegung des Antriebes stellt einen Kompromiss zwischen der gewünschten oder benötigten Kraft an der Fingerspitze, der Schließzeit sowie des Energieverbrauchs des Gesamtsystems dar. Abbildung 7-3 zeigt, dass der Zusammenhang nicht linear ist.

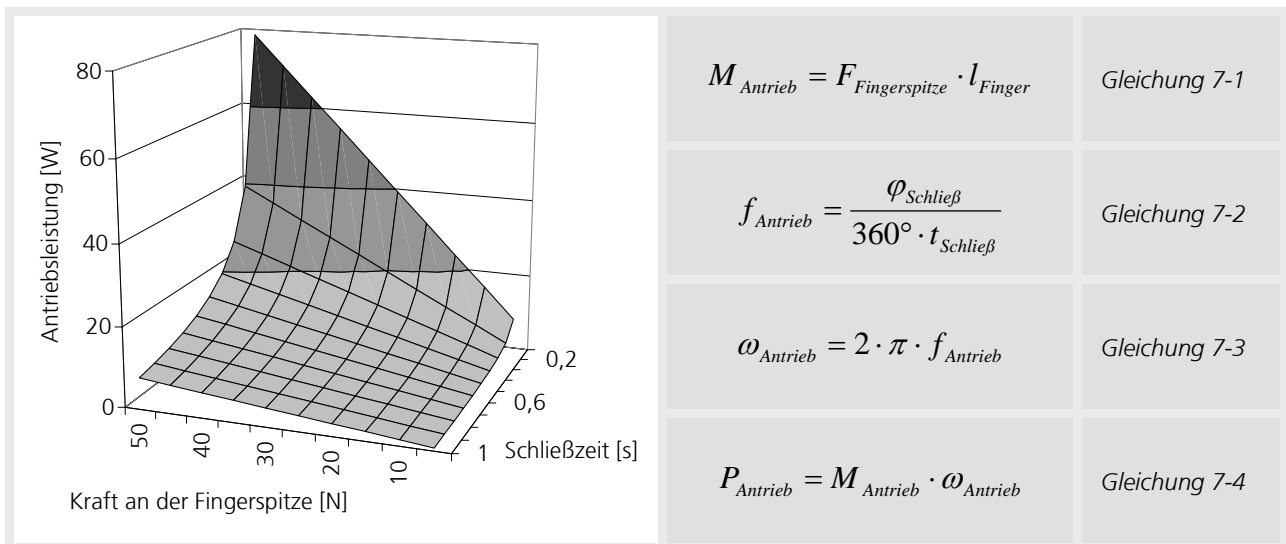


Abbildung 7-3: Antriebsleistung in Abhängigkeit von der Kraft an der Fingerspitze und der Schließzeit des Fingers bei einer angenommenen Fingerlänge von 100 mm und einem Schließweg von 90 ° sowie die entsprechenden Berechnungsgrundlagen

Für die IPA-Hand I wurde eine Greifkraft an den Fingerspitzen von 30 N angestrebt. Bei künstlichen Händen für mobile Anwendungen sollte ein Richtwert von 60 W für die Leistungsaufnahme möglichst unterschritten werden /Butterfaß 1999/. Um dies zu

erreichen, wurde eine Schließzeit von 0,4 s ausgewählt, die zu einer Antriebsleistung von ca. 20 W pro Antrieb führt.

7.1.3 Steuerung

Die Steuerung basiert auf einem Ein-Chip-PC, einem 80x86 kompatiblen Rechner, dem IPC@CHIP der Beck GmbH. Der Chip wurde von der Firma Synertronixx auf einem Board mit Treibern und verschiedener Peripherie integriert. Dieses Board, mit der Bezeichnung DeviLan, verfügt über einen Ethernet-Stack, der eine Ansteuerung über ein Netzwerk ermöglicht.

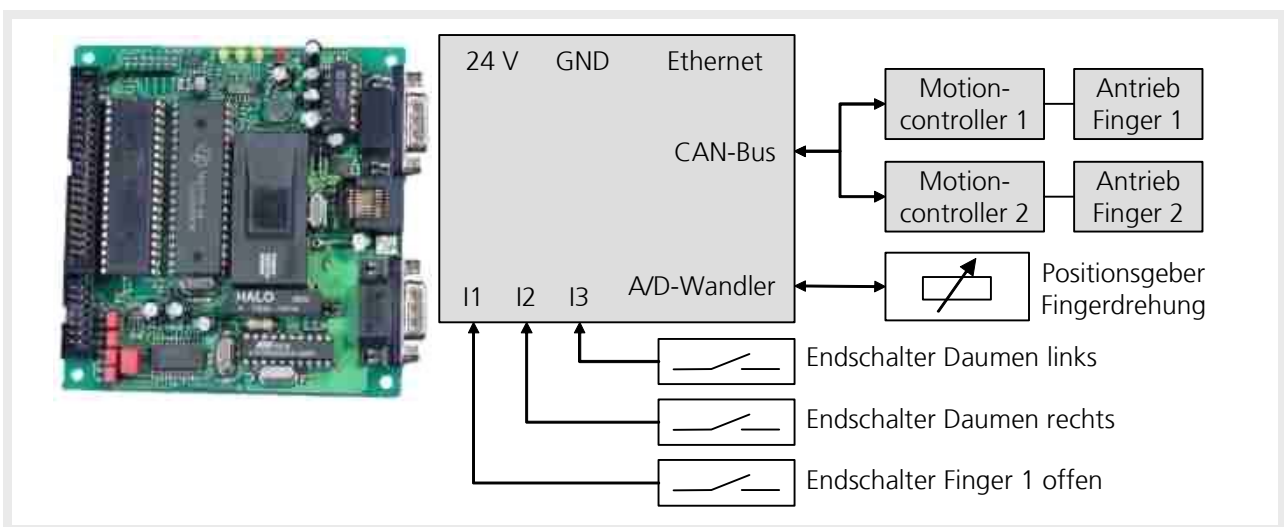


Abbildung 7-4: Aufbau der Steuerungshardware

Die steuerungstechnischen Komponenten sind in Abbildung 7-4 dargestellt.

Die Steuerung ist so programmiert, dass die drei Fingerkonfigurationen aus der Grundstellung, dem 3-Finger-Parallel-Griff, in die anderen Griffe mit nur wenigen Befehlen ansteuerbar sind.

Neben den in Abbildung 7-5 dargestellten Befehlen existieren Befehle zur Parametrierung hinsichtlich maximaler Antriebsmomente, Geschwindigkeiten, Reglerparameter, etc. der IPA-Hand I.

GripperConfig(Configuration)	Befehl zur Einstellung einer der drei Fingerkonfigurationen. Eine Umkonfiguration der Hand kann nur in einem Zustand erfolgen in dem kein Objekt gegriffen ist.
GripperClose(Angle, Force)	Befehl zum Schließen der Hand. Es stehen zwei Modi zur Verfügung: Ein Schließen auf eine Sollposition (für bekannte Objektgröße) oder ein kraftgesteuertes Schließen.
GripperFeedback(Force, Angle)	Jeweils für den umgekehrten Fall der Schließbewegung ist es sinnvoll, die sich ergebenden Fingerkräfte oder die Fingerstellung abzufragen, um Rückschlüsse auf das Greifobjekt zu ziehen.
GripperStop()	Stoppt alle Bewegungen des Greifers z.B. in einer Not-Aus-Situation. Dem Stop-Befehl muss ein Öffnen-Befehl folgen.
GripperOpen()	Öffnet den Greifer.

Abbildung 7-5: Grundbefehle zur Ansteuerung der IPA-Hand I in Pseudo-Code.

7.1.4 Technische Daten der IPA-Hand I

Die technischen Daten der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I sind in Abbildung 7-6 dargestellt.

Abstand zwischen den Fingern 1 und 2	l_{F1-F2}	80	mm
Abstand zwischen Daumen und Fingern	l_{D-F}	80	mm
Länge der Finger	l_F	100	mm
Länge des Daumens	l_D	100	mm
Öffnungswinkel der Finger	α	+/- 45	°
Schwenkwinkel der Finger	β	+/- 60	°
Drehmoment der Antriebe	M	5	Nm
Schließzeit pro Finger	t	0,4	s
Greifkraft an jeder Fingerspitze	F_{max}	50	N
Masse	m	4,35	kg

Abbildung 7-6: Technische Daten der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I

7.1.5 Versuchsaufbau

Die Versuche mit der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I wurden mit den in Abbildung 7-7 beschriebenen Objekten durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle notwendigen Griffe ausgeführt wurden und ein möglichst breites Spektrum an Abmessungen an der Griffstelle auftraten.

	Kugel	Stutzen	Zylinder	Objektiv
Abmessung an der Griffstelle	75 mm	30 mm	50 mm	65
Material	PVC	Alu Druckguss	PVC	Alu gedreht
Masse	0,5 kg	0,2 kg	0,6 kg	0,17 kg

Abbildung 7-7: Objekte für die Versuchsdurchführung

7.1.6 Durchführung von Greifversuchen mit der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I

Die Versuche zeigen, dass für jedes der untersuchten Objekte ein Griff gefunden werden kann, der zu einem sicheren Griff führt. Alle Objekte, die mit dem 3-Finger-Parallel-Griff gegriffen wurden, konnten bei einer Greifkraft von 30 N der Hand nicht „entrisen“ werden. Beim 3-Finger-Zentrisch-Griff wirken ausreichend hohe Kräfte auf das Objekt, so dass ein stabiler Griff für Objektdurchmesser kleiner 80 mm gewährleistet ist. Mit dem 2-Finger-Griff lassen sich die untersuchten Objekte aufnehmen. Schnelle Bewegungen oder Kräfte größer 7 N führen jedoch zu einem Verlieren des Objektes. Die Begründung liegt in der Anordnung der Finger zueinander, der Finger führt eine rotatorische Bewegung in Richtung des Greifobjektes aus. Überschreitet die Objektabmessungen den Abstand zwischen Daumen und Finger kann kein Formschluss erzeugt werden.



Abbildung 7-8: Griffe für die unterschiedlichen Objektgeometrien

7.1.7 Folgerungen aus den Versuchen

Die Versuche mit der Gesamtsystemvariante IPA-Hand I haben nachgewiesen, dass mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz zur Fingeranordnung das Greifen geometrievarianter Objekte möglich ist. Die Zuverlässigkeit des Demonstrators ist mit industriellen Greifern vergleichbar. Die Umkonfiguration der drei Grundgriffe mit nur zwei elektrischen Antrieben ist einzigartig. Um die IPA-Hand I weiter zu verbessern, müssen folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

- Die benötigte Zeit zur Umkonfiguration der Finger muss hinsichtlich einer schnellen Reaktion auf die aktuell vorherrschende Situation beschleunigt werden. Die Bewegungsabläufe, die während der Umkonfiguration entstehen, scheinen kompliziert, wodurch eine gewisse Skepsis beim Benutzer hervorrufen werden könnte. Es muss also ein Kompromiss zwischen niedriger steuerungstechnischer Komplexität, Ästhetik und Komponentenkosten gefunden werden. Das größte Potenzial, diesen Kompromiss einzugehen, liegt in der Integration eines weiteren Antriebes zur Positionierung des Daumens.
- Die Versuche zeigen weiterhin, dass die Antriebe für Anwendungen im Haushalt deutlich überdimensioniert sind, wodurch zum einen der Greifer schwer wird und zum anderen ein hohes Gesamtgewicht resultiert.
- Die steifen Finger müssen gegen selbstadaptive Finger nach dem Finray-Effekt ausgetauscht werden, um die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Greifer und Greifobjekte und damit die Sicherheit des Griffes zu erhöhen.

7.2 Aufbau und Erprobung der Gesamtsystemvariante IPA-Hand II

Die IPA-Hand II basiert wie schon die IPA-Hand I auf der in Kapitel 4.2.1 konzipierten Fingeranordnungsvariante 5.

Im Gegensatz zur IPA-Hand I verfügt diese Variante über selbstadaptive Finger nach dem Finray-Effekt sowie über drei elektrische Antriebe, einen in jedem Finger und einen zur Verschiebung des Daumens. Um das beim Greifen entstehende Moment auf die Hochachse der Finger abzufangen, sind in den Fingern elektrische Bremsen integriert.

Abbildung 7-9 zeigt das 3D-Modell der IPA-Hand II mit den drei Grundgriffarten 2-Finger-Griff, 3-Finger-Parallel-Griff und 3-Finger-Zentrisch-Griff.

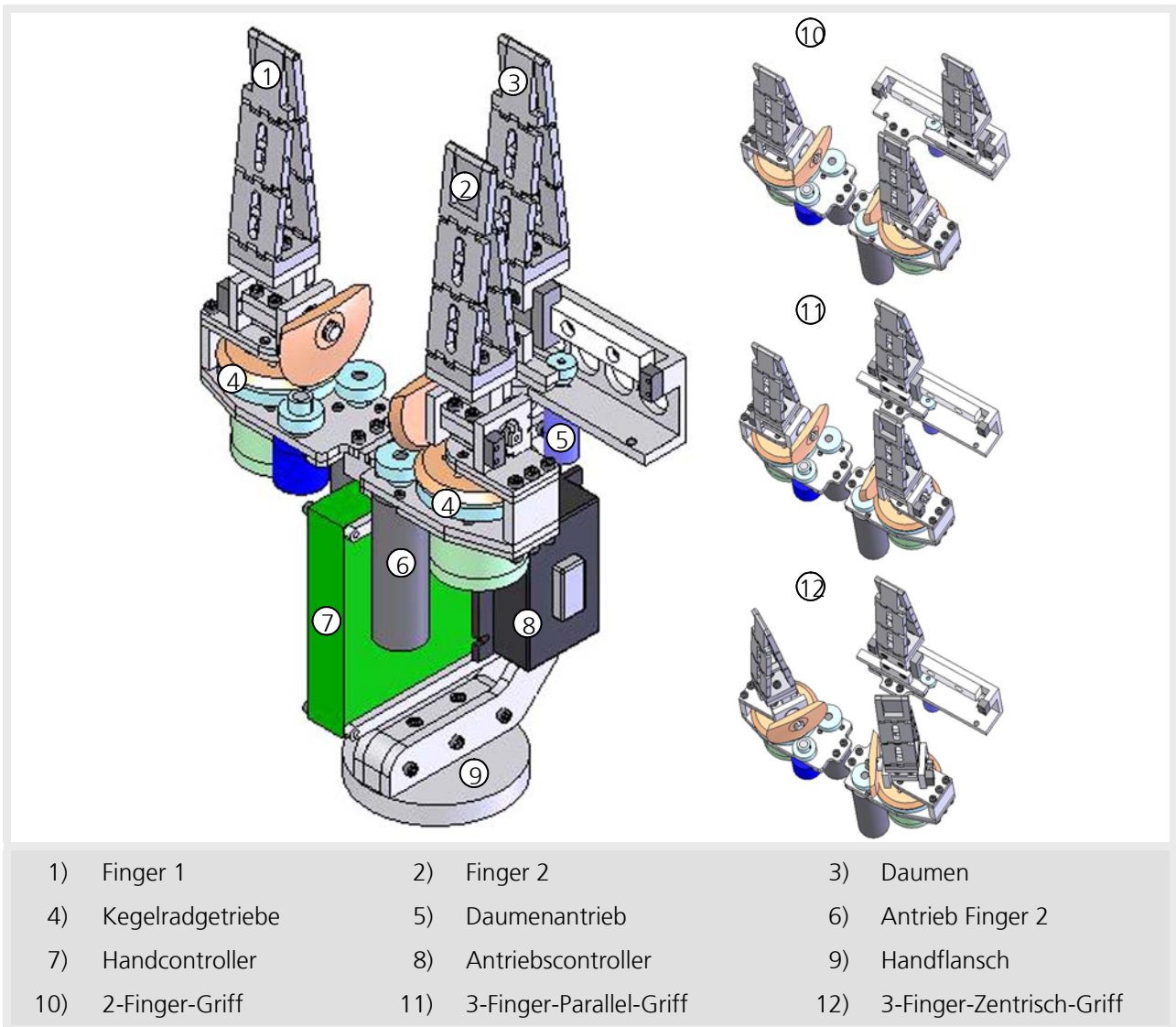


Abbildung 7-9: Aufbau der Gesamtsystemvariante IPA-Hand II

Um den Greifer optimal an die vorhandenen Objekte anpassen zu können, wurde die IPA-Hand II modular aufgebaut, d.h. es existiert ein Daumenmodul und zwei baugleiche Fingermodule. Somit ist es möglich, durch eine entsprechende Gestaltung der „Handfläche“ die Finger in Abständen und Orientierungen optimal anzupassen.

7.2.1 Fingerkonfiguration

Zur Konfiguration der Finger verfügt der Daumen über eine elektrisch angetriebene Lineareinheit, die nicht mehr wie bei der IPA-Hand I mit den Fingern gekoppelt ist. Dadurch kann der Zeitaufwand zur Umkonfiguration der Finger reduziert werden. Um jedoch die steuerungstechnische Komplexität gering zu halten, verfügt der Antrieb weder über einen

Positions- noch über einen Geschwindigkeitsregler. Die Wegbegrenzung des Antriebs wird mittels zweier Endschalter realisiert (Abbildung 7-10, links).

Das Fingermodul (Abbildung 7-10, Mitte und rechts) verfügt über einen elektrischen Antrieb, der sowohl über einen Positions- als auch über einen Geschwindigkeitsregler verfügt. Der Antrieb greift über eine Stirnradstufe auf eine Kegelradstufe die wiederum auf die horizontale Welle des Fingers wirkt. Anschläge in der Fingerbasis begrenzen die Greifbewegung, so dass der Antrieb ein Moment aufbringt, welches eine Drehung des Fingers um seine vertikale Welle bewirkt.

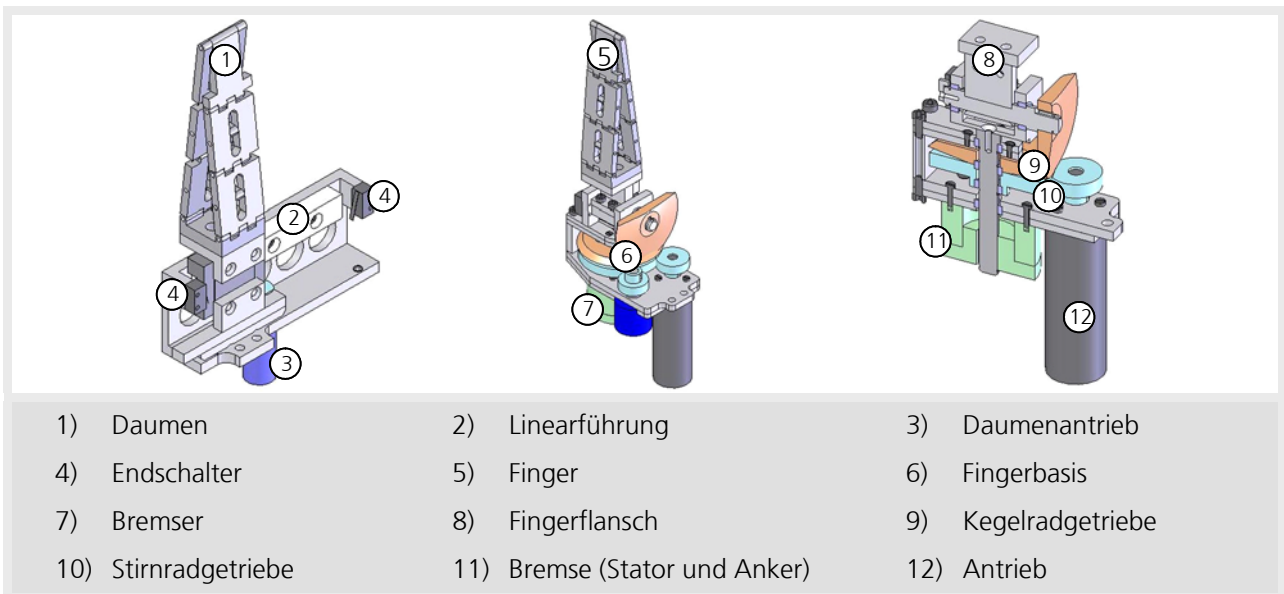


Abbildung 7-10: Konfiguration eines Fingers

Trifft der Finger, ohne auf einen der Anschläge zu fahren, auf ein Greifobjekt wird ebenfalls ein Moment auf die vertikale Welle des Fingers ausgeübt. Dieses Moment muss durch eine Bremse aufgenommen werden, da sich der Finger sonst während der Greifbewegung vom Greifobjekt wegdrehen würde.

7.2.2 Steuerung der IPA-Hand II

Die Steuerung der IPA-Hand II basiert ebenfalls auf dem DeviLan-Modul der Fa. Synertronixx. Beide Antriebe verfügen über Antriebscontroller, die über eine RS232-Multiplexerplatine angesprochen werden. Da die Drehbewegung der beiden Fingermodule nicht wie in der Variante I durch Zahnräder gekoppelt ist, muss jedes der Fingermodule mit einem Wegmesssystem, welches die Drehwinkel des Fingermoduls überwacht, ausgestattet werden. Die Ansteuerung der IPA-Hand II ist ansonsten genau gleich mit der IPA-Hand I.

7.2.3 Technische Daten der IPA-Hand II

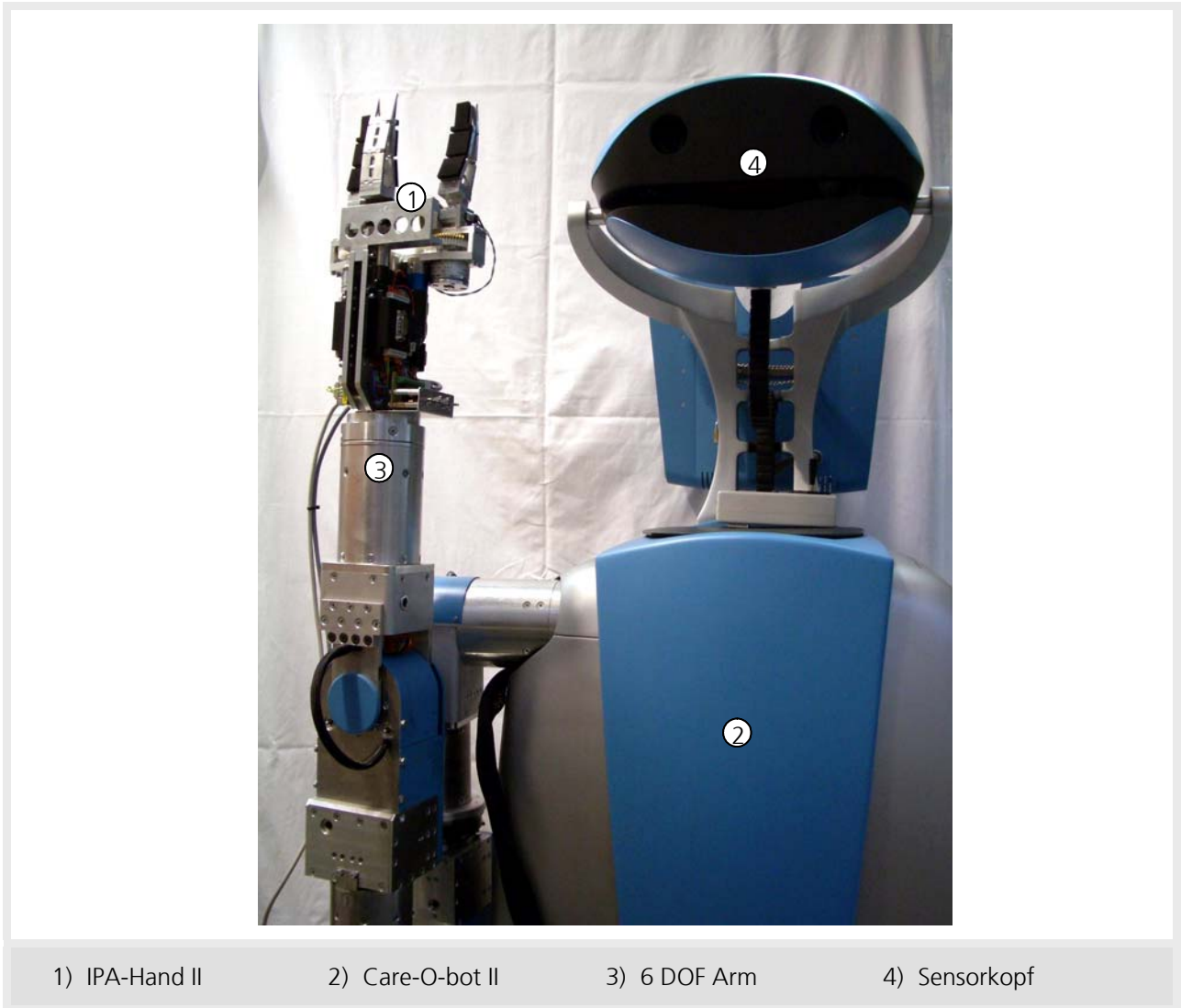
Die technischen Daten der IPA-Hand II sind in Abbildung 7-11 zusammengefasst.

Abstand zwischen den Fingern 1 und 2	l_{F1-F2}	115	mm
Abstand zwischen Daumen und Fingern	l_{D-F}	50	mm
Länge der Finger	l_F	110	mm
Länge des Daumens	l_D	110	mm
Öffnungswinkel der Finger	α	+/- 45	°
Schwenkwinkel der Finger	β	+/- 60	°
Drehmoment der Antriebe	M	1	Nm
Schließzeit pro Finger	t	0,1	s
Greifkraft an jeder Fingerspitze	F_{max}	10	N
Masse	m	2,54	kg

Abbildung 7-11: Technische Daten der Gesamtsystemvariante IPA-Hand II

7.2.4 Versuchsaufbau

Die IPA-Hand II wird in Verbindung mit dem Roboterassistenten Care-O-bot II (Vergleiche Kapitel 2.2.1) erprobt. Care-O-bot II verfügt über einen Arm mit sechs Freiheitsgraden. Abbildung 7-12 zeigt die IPA-Hand II an Care-O-bot II.



1) IPA-Hand II 2) Care-O-bot II 3) 6 DOF Arm 4) Sensorkopf

Abbildung 7-12: Die IPA-Hand II am Roboterassistenten: Care-O-bot II

7.2.5 Durchführung von Greifversuchen mit der IPA-Hand II

Um die vielfältigen Griffmöglichkeiten nachzuweisen, wurde eine repräsentative Stichprobe der in Kapitel 3 analysierten Objekte ausgewählt. Für die einzelnen Griffe wurden verschiedene Armpositionen angefahren und ein entsprechender Griff ausgeführt.

Um die Reibeigenschaften und die Adaptivität der Finger weiter zu verbessern, wurden die Fingerglieder mit einem ca. 5 mm dicken Moosgummi beklebt. Da in der IPA-Hand II derzeit keine Kraftsensoren integriert sind, wurden die Finger positionsgeregelt verfahren, bis ein sicherer Griff entstand.

Zum Greifen kleiner Teile, deren Länge, Breite oder Durchmesser nicht für einen 3-Finger-Griff geeignet sind, wird der 2-Finger-Griff ausgewählt.

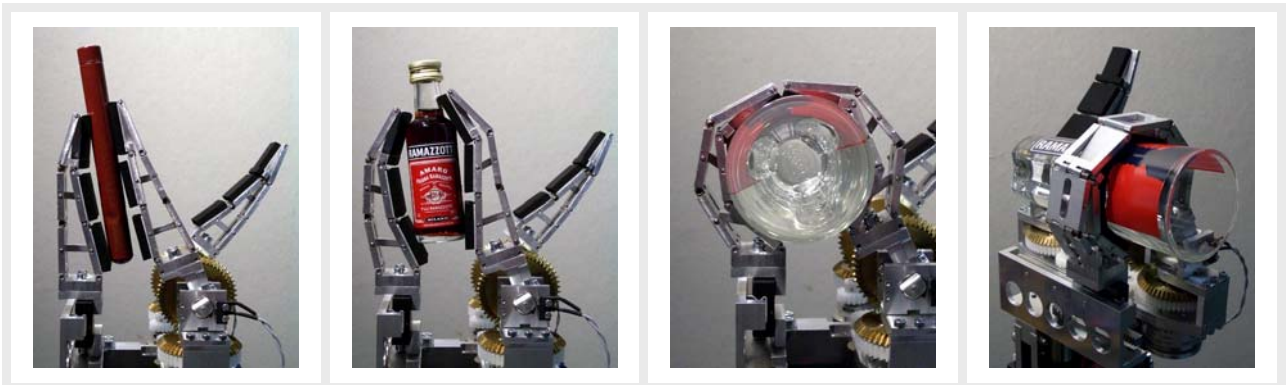


Abbildung 7-13: Verschiedene Objekte im 2-Finger-Griff zwischen Daumen und Finger in vertikaler Pose der Hand

Abbildung 7-13 zeigt verschiedene Objekte im 2-Finger-Griff. Finger und Daumen der IPA-Hand II sind dabei vertikal und nach oben geöffnet angeordnet. Diese Griffkonfiguration kann typischerweise für die Übergabe von Objekten an die Hand genutzt werden, da die Greifbewegung vom Benutzer optimal überwacht werden kann und bei einem Fehlgriff das Greifobjekt durch die Handfläche des Greifers abgefangen wird.

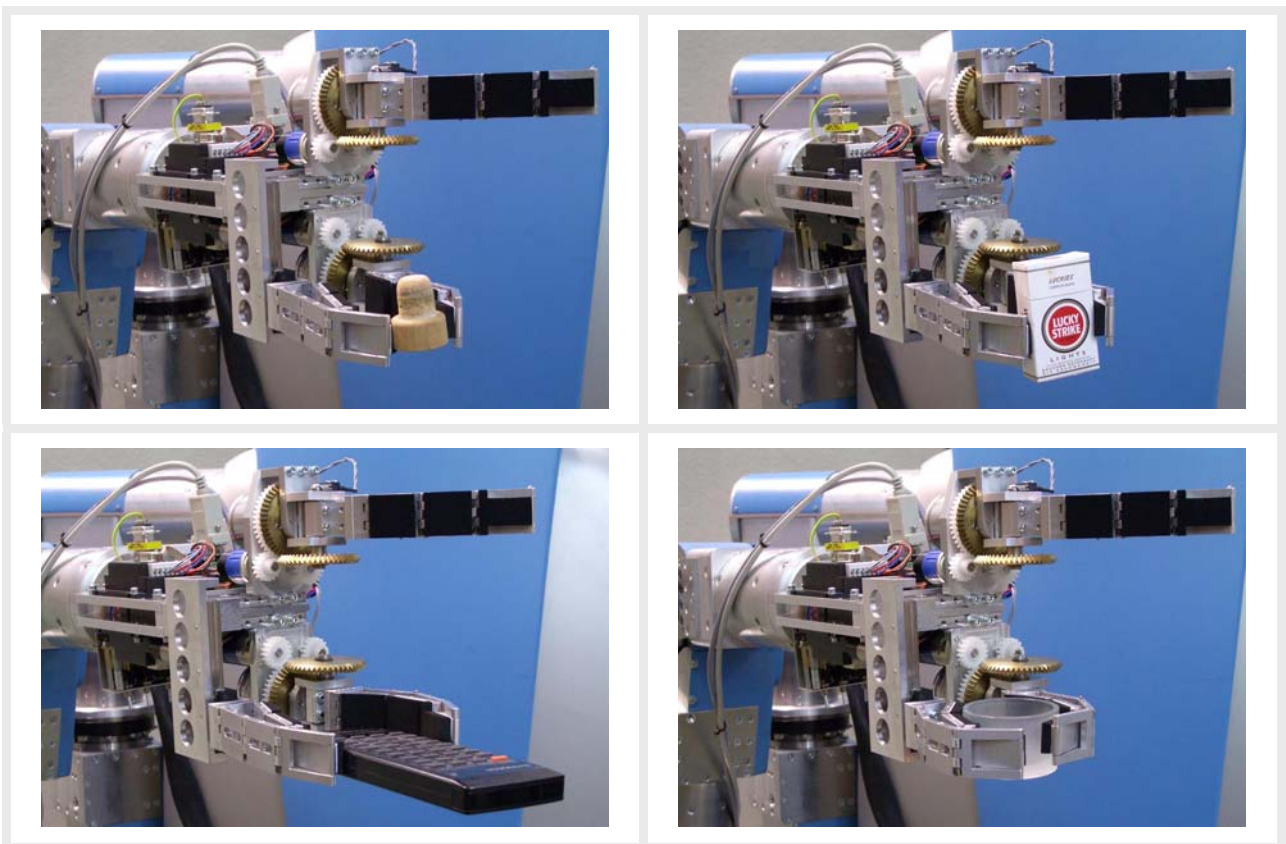


Abbildung 7-14: Verschiedene Objekte im 2-Finger-Griff zwischen Daumen und Finger in horizontaler Pose der Hand

Abbildung 7-13 zeigt zylindrische Objekte mit den Durchmessern 12 mm (Zigarre), 35 mm (Miniaturlflasche) und 60 mm (Glas), wobei die Zigarre und die Miniaturlflasche in der dargestellten Pose auch quaderförmigen Objekten entsprechen.

Um kleine Objekte von einer ebenen Fläche wie z.B. einem Tisch aufzunehmen, müssen die beiden Finger parallel zur Fläche verfahren werden. Abbildung 7-14 zeigt gegriffene Objekte in dieser Pose. Bei der Konstruktion und Anordnung der Fingermodule wurde darauf geachtet, den Abstand zwischen Fingern und Greiferrand zu minimieren, da ansonsten Objekte, die in der Mitte einer großen Fläche liegen, in dieser Pose nicht aufgenommen werden können. Für den Fall, dass ein Objekt von einer Fläche aufgenommen werden soll, ist der kleinste noch sicher greifbare Objektdurchmesser 10 mm.

Eine weitere Möglichkeit, einen 2-Finger-Griff zu konfigurieren, besteht darin, die beiden Finger so zu drehen, dass sie sich opponieren. In dieser Konfiguration ist es möglich, Objekte mit größerem Durchmesser sicher zu greifen (Abbildung 7-15). In dieser Griffkonfiguration ist jedoch die Masse des Objektes beschränkt. Versuche zeigten, dass mit dem beschriebenen Reibbelag Objekte mit einer Masse von 250 Gramm noch sicher gegriffen werden konnten.



Abbildung 7-15: Verschiedene Objekte im 2-Finger-Griff zwischen zwei Fingern

Um lange, zylindrische oder prismatische Objekte zu greifen bietet sich der 3-Finger-Parallel-Griff an. Aufgrund des hier realisierten mittleren Abstandes zwischen den Fingern von 115 mm können nur längere Objekte in dieser Konfiguration gegriffen werden.

Abbildung 7-16 zeigt unterschiedliche, zylindrische Objekte in verschiedenen Posen die im 3-Finger-Parallel-Griff gehalten werden. Der Bereich greifbarer Durchmesser liegt zwischen 10 mm und 110 mm. Für kleine Durchmesser ist die Fertigungsgenauigkeit der

Fingerkinematik ausschlaggebend. Bei leichten Abweichungen bzgl. der geometrischen Zusammenhänge tendiert die Kinematik zum „Einrollen“, d.h. die Fingerspitzen versuchen das Objekt an den Greifer heran zu ziehen, dies führt zu einem suboptimalen Griff.

Der 3-Finger-Parallel-Griff bietet aufgrund seiner hohen Zahl an Kontaktpunkten einen sehr sicheren Griff. In Versuchen wurden Massen bis 1,5 kg problemlos gegriffen (vgl. Sektflasche unten Mitte).

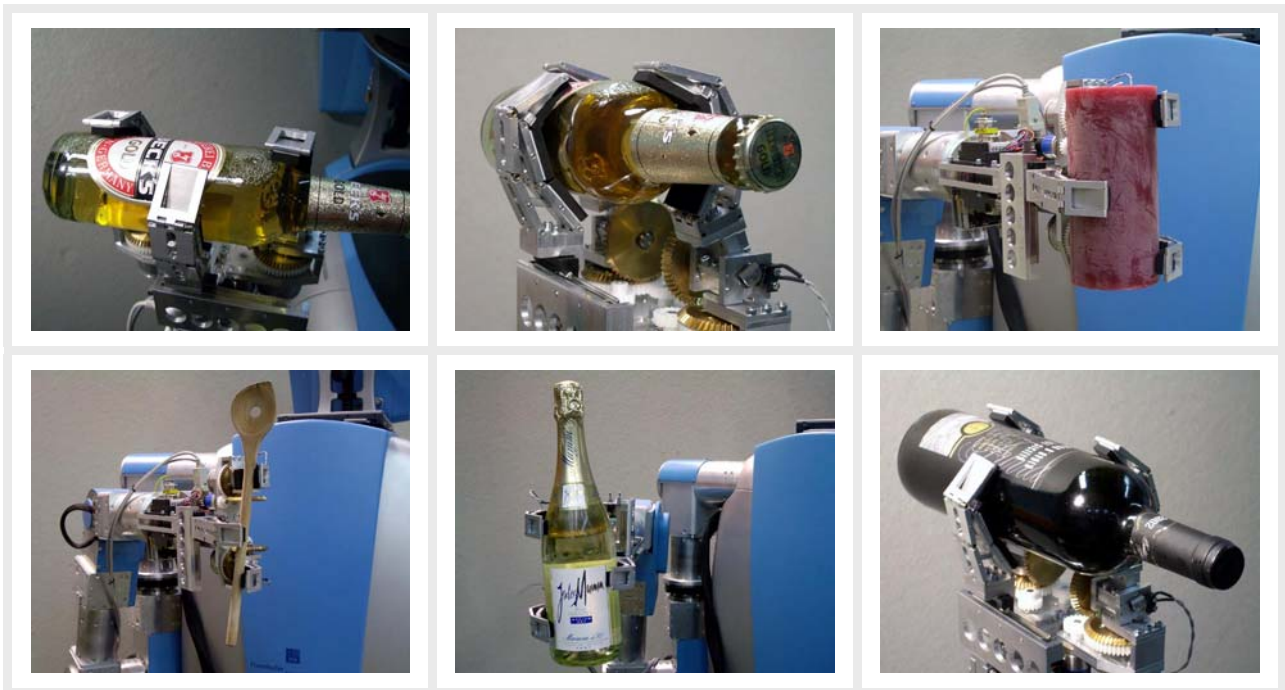


Abbildung 7-16: Verschiedene Objekte im 3-Finger-Parallel-Griff

Der 3-Finger-Parallel-Griff kann auch zum Greifen scheibenförmiger Objekte eingesetzt werden. Abbildung 7-17 zeigt einen Teller, der in dieser Fingerkonfiguration gegriffen wird. Dabei stützt sich der Tellerboden auf dem Daumen ab und die Finger halten den Teller in der Waagerechten.

Die Anordnung der Finger ist für diesen Griff allerdings nicht optimal, da keine hohen Kräfte auf das Objekt ausgeübt werden können. Ein kleiner Abstand zwischen Fingern und Daumen würde hier zu sichereren Griffen führen, schränkt aber die Griffmöglichkeiten für größere Objekte stark ein.



Abbildung 7-17: Teller im 3-Finger-Parallel-Griff

Die letzte Fingerkonfiguration bildet der 3-Finger-Zentrisch-Griff (Abbildung 7-18). Mit ihm können kugelförmige und zylindrische Objekte in axialer Richtung gegriffen werden.

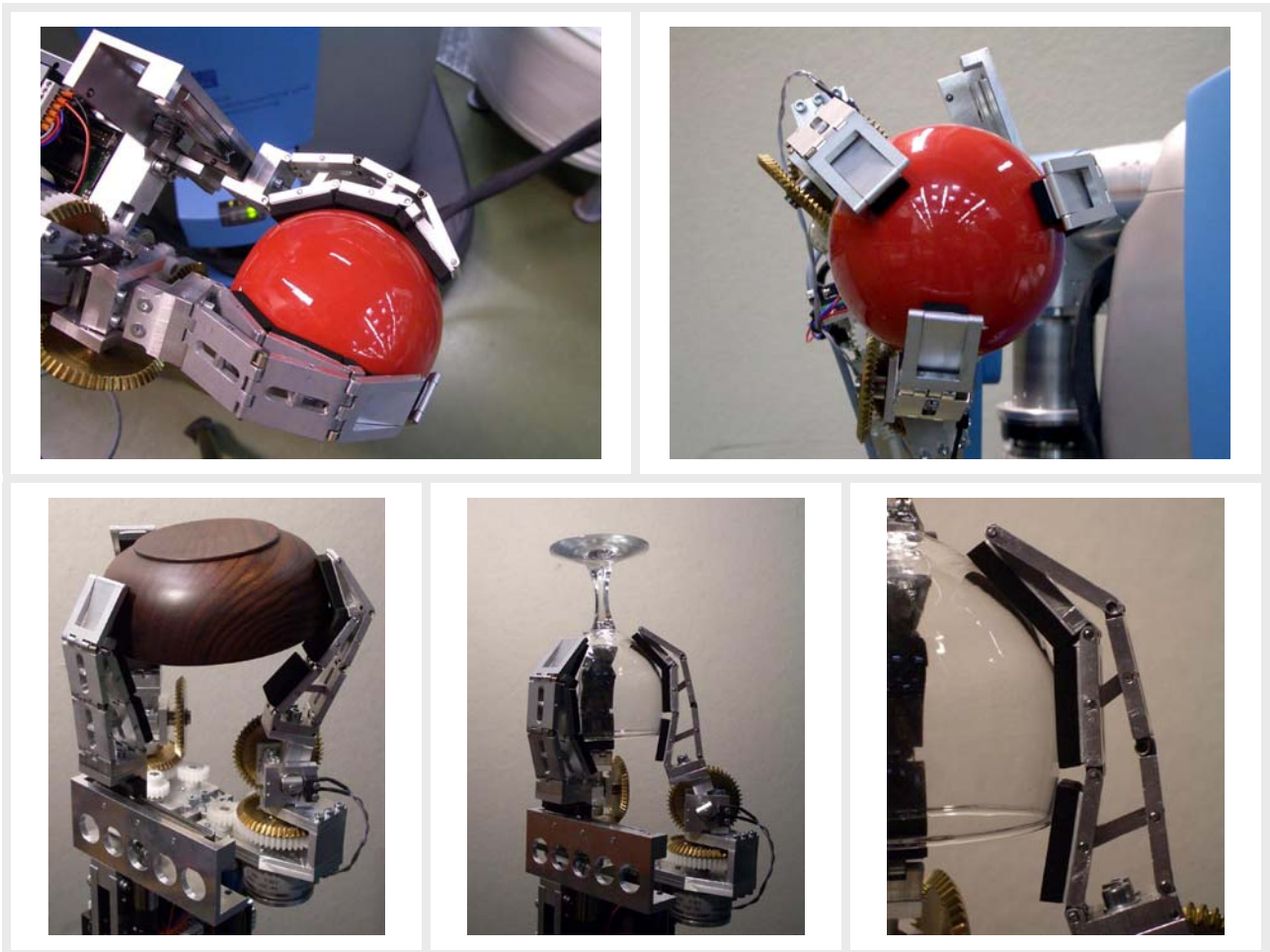


Abbildung 7-18: Zylinder- und Kugelförmige Objekte im 3-Finger-Zentrisch-Griff

Wie schon der 3-Finger-Parallel-Griff realisiert der 3-Finger-Zentrisch-Griff je nach Objektdurchmesser eine große Anzahl an Kontaktpunkten. Durch die frei programmierbare

Drehbarkeit der Finger kann gewährleistet werden, kugelförmige Objekte formschlüssig zu greifen, so dass die Gewichtskraft des Objektes immer durch mindestens einen Finger aufgenommen wird.

7.2.6 Folgerungen aus den Versuchen

Die Versuche mit der Gesamtsystemvariante IPA-Hand II haben den Funktionsnachweis für ein flexibles Greifsystem mit selbstadaptiven Fingerkinematiken nach dem Finray-Effekt für Roboterassistenten im Haushalt erbracht. Die IPA-Hand II bietet hohe Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien bei gleichzeitig niedriger mechanischer und steuerungstechnischer Komplexität.

In Anlehnung an /Butterfaß 1999/ wird die Robustheit von Greifsystemen wie folgt definiert „Robustheit ist die Unempfindlichkeit eines geplanten Griffes gegenüber Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Finger und gegenüber kleinen Objektbewegungen, die durch die Schließbewegung der Finger hervorgerufen werden“. Legt man diese Definition bei der Bewertung der IPA-Hand II zugrunde kann die Hand als überaus robust betrachtet werden.

Optimierungsbedarf besteht in den folgenden Punkten:

- Die elektrische Bremse zur Fixierung der Drehbewegung der Finger während der Greifbewegung muss hinsichtlich ihrer Haltekraft überarbeitet werden. Im 2-Finger-Griff, bei dem sich die beiden Finger gegenüberstehen, drehen sich die Finger bei zu hoher Krafteinwirkung vom Greifobjekt weg.
- Um das Verhältnis zwischen Greifkraft und Greifergewicht weiter zu optimieren sollten Leichtbaumaterialien eingesetzt werden. Hierdurch kann zusätzlich zum Gewicht die Größe des Greifers optimiert werden.
- Um feinfühligere Greifoperationen durchzuführen und den Greifer so unabhängiger von externer Sensorik, z.B. 3D-Erfassungssystemen, zu machen sollten Kraftsensoren in die Finger integriert werden. Hier bietet sich der Einsatz einer taktilen Sensorhaut an. Es existieren bereits Ansätze solche Systeme, die auf unterschiedlichen Prinzipien beruhen, in Greiferfinger zu integrieren. Um die steuerungstechnische Komplexität dadurch nicht zu erhöhen, sollten diese Kraftsensoren über eigene Controller verfügen, die z.B. über eine Busschnittstelle in die vorhandene Steuerung integriert werden können.

- Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz bietet aufgrund seiner niedrigen steuerungstechnischen Komplexität im Zusammenhang mit 3D-Erkennungssystemen großes Potenzial, Objekte vollständig autonom zu greifen. Dieser Zusammenhang bezieht sich im Wesentlichen auf die Fähigkeiten, ohne großen Planungsaufwand für die Konfiguration der Finger, unbekannte Objekte zu greifen. Die Auswertung der Daten eines 3D-Erkennungssystems kann sich im Wesentlichen auf die Ermittlung der vorherrschenden Grundgeometrie beschränken. Geeignete Algorithmen zur Approximation der 3D-Daten, die z.B. in Form einer Punktwolke vorliegen, müssen speziell für die hier vorgestellte Gesamtsystemvariante entwickelt werden und sind nicht Stand der Technik.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Erste Produkte von Servicerobotern etablieren sich in unterschiedlichen Anwendungen am Markt. Vorreiter sind autonome Bodenstaubsauger, Rasenmäher, Roboterspielzeuge und Überwachungsroboter. Nach Einschätzung von Experten sind so genannte Roboterassistenten der nächste logische Entwicklungsschritt. Roboterassistenten sind höher entwickelte Maschinen, die den Menschen in seinem täglichen Leben unterstützen sollen. Der Einsatz von Roboterassistenten als Helfer des Menschen bietet vielfältigen Nutzen z.B. in der Verringerung körperlicher Belastungen.

Um dies leisten zu können, müssen sie über eine erweiterte, dem Menschen ähnliche, Wahrnehmungs-, Interaktions- und Kommunikationsfähigkeit verfügen. Roboterassistenten müssen ihre Umwelt wahrnehmen können, eigenständige Handlungen vollziehen und mit dem Benutzer und der Umwelt interagieren können. Das Greifen und die Manipulation von Objekten gelten hierbei als Schlüsselfunktionen von Roboterassistenten.

Klassische 2-Finger-Greifer, wie sie im industriellen Umfeld oft eingesetzt werden, stellen nach Meinung vieler Experten, keine Lösung für hoch entwickelte Roboterassistenten dar. Künstliche Hände, wie sie in den vergangenen Jahren vorgeschlagen wurden, bieten eine Reihe von technisch akzeptablen Lösungen sind aber zu komplex, unhandlich, teuer und unrentabel für den praktischen Einsatz außerhalb des Labors.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, Lösungsansätze und Konzepte für flexible und niedrig komplexe Greifsysteme zu schaffen, die es Roboterassistenten ermöglichen, mit ihrer Umwelt zu interagieren und flexibel auf sich ändernde Handhabungssituationen zu reagieren. Hierzu wurde der Finray-Effekt, ein bionisches Prinzip für selbstadaptive Systeme, theoretisch untersucht und für den Einsatz als Fingerkinematik in flexiblen Greifsystemen nutzbar gemacht. Das Greifsystem soll dabei den Anforderungen bezüglich eines Einsatzes in Roboterassistenten für den Haushaltsbereich genügen. Weiterführendes Ziel war es, Verfahren zur Planung optimaler Greifpositionen zu erarbeiten. Neben den theoretischen Grundlagen zur Auslegung einer entsprechenden Fingerkinematik und eines Verfahrens zur Berechnung der Fingerkontaktkräfte in der Gleichgewichtslage sollte die technische Machbarkeit anhand eines Prototypen nachgewiesen und das Verfahren verifiziert werden.

Ausgehend vom Stand der Technik wurden typische Einsatzszenarien für Roboterassistenten im Haushalt hinsichtlich ihrer Randbedingungen an flexible Greifsysteme analysiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die geometrischen Merkmale der Greifobjekte gelegt. Um die unterschiedlichen Objektgeometrien analysieren zu können wurde eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist, Objekte hinsichtlich ihrer greiftechnischen relevanten Geometrien zu klassifizieren.

Die analysierten Szenarien sind das Servieren von Getränken, das Ausräumen einer Spülmaschine und das Holen und Bringen von Gebrauchsgegenständen. Die Analyse dieser Szenarien lieferte die Anforderungen an ein flexibles Greifsystem für Roboterassistenten im Haushalt. Weiterhin wurden Teilsysteme definiert und der Einfluss der Anforderungen an die Teilsysteme diskutiert.

Auf Basis der erarbeiteten Anforderungen wurden grundlegende Lösungsansätze für die einzelnen Teilsysteme betrachtet und flexible Gesamtkonzeptlösungen kombiniert. Ein Konzept mit drei Fingern, die sich zu drei unterschiedlichen Grifftypen konfigurieren können, stellte sich als viel versprechend heraus. Die Kombination dieser Greiferkinematik mit dem oben beschriebenen Finray-Effekt wurde als favorisiertes Gesamtkonzept ausgewählt und weiter detailliert.

Vorrangig erschien hier die grundlegende Untersuchung des Finray-Effektes hinsichtlich seiner greiftechnischen Fähigkeiten. Hierfür wurde der Finray-Effekt in Form einer selbstadaptiven diskreten Kette aus Fingergliedern weiter vereinfacht. Auf Basis dieser Vereinfachung wurde die Kinematik geometrisch und hinsichtlich der resultierenden Kräfte in allgemeiner Form für n-gliedrige Kinematiken modelliert. Anhand der Modelle lassen sich nun n-gliedrige selbstadaptive Fingerkinematiken auslegen und hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen bzgl. der entsprechenden Greifaufgabe bewerten.

Um das Verhalten bzgl. unterschiedlicher Objektgeometrien zu untersuchen, wurden umfangreiche Bewegungssimulationen durchgeführt. Anhand dieser Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Kinematik ein bzgl. der Greifkräfte selbstoptimierendes Verhalten aufweist.

Auf Basis dieser grundlegenden Untersuchung wurde ein Verfahren entwickelt, welches ausgehend von einem Objektmodell vorhersagen über den Gleichgewichtszustand der Fingerkinematik zulässt. Bei der Verfahrensentwicklung wurde Wert auf eine schnelle Berechnung der Konfiguration gelegt, da die Berechnung mit Hilfe von

Mehrkörpersystemen bzw. den zur Beschreibung herangezogenen Differentialgleichungen aufwändig und rechenintensiv ist. Das entwickelte Verfahren wurde in einer Modellrechnung erprobt und anhand von Versuchen validiert.

Um die Praxistauglichkeit der Entwicklungen zu bestätigen, wurden zwei Gesamtsystemvarianten aufgebaut und hinsichtlich ihrer Greifmöglichkeiten im Umgang mit geometrievarianten Objekten untersucht. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der Gesamtsystemvarianten liegen in der Umsetzung des Antriebes sowie in der Gestaltung der Finger. Die Gesamtsystemvariante IPA-Hand I verfügt über nur zwei elektrische Antriebe, mit denen drei unterschiedlichen Fingeranordnungen konfiguriert werden können. Die Finger der IPA-Hand I sind in sich starr.

Die IPA-Hand II wurde gegenüber der IPA-Hand I um einen dritten Antrieb erweitert, der Konfigurationszeiten signifikant verringert. Weiterhin wurde die IPA-Hand II hinsichtlich Größe und Gewicht deutlich optimiert. Die IPA-Hand II verfügt über drei selbstadaptive Finger nach dem Finray-Effekt.

Beide Hände verfügen über eine vollständig integrierte Steuerungstechnik, die eine einfache Ansteuerung über Ethernet ermöglicht. Kraftsensoren zur Erfassung der Greifkräfte wurden nicht integriert. Beide Hände überzeugen durch ihre hohe Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien. Die IPA-Hand II ist aufgrund der integrierten selbstadaptiven Fingerkinematik in der Lage, ein enormes Objektspektrum abzudecken. Die niedrige Komplexität hinsichtlich des mechanischen Aufbaus und des Planungsaufwandes prädestinieren diese Art von Händen für Roboterassistenten im Haushaltsbereich.

9 Summary

First products of service robots were established on markets world wide. Vacuum cleaners, mowers, toys and surveillance robots are currently the applications with the highest growth rates. In the opinion of experts in the field of service robotics so called robot assistants are the next logical step in this development. The main task of robot assistants will be the support of human beings in their daily life. The reduction of mental and physical stress to the user is one of the major advantages of robot assistants.

Robot assistants need capabilities of sensing, interaction and communication which should be rather close to that of human beings. To support the users in their daily life they have to recognise their environment, conduct own actions and communicate with an user or the environment itself. In this relation gripping and manipulation of objects are key functionalities of robot assistants.

Classical two-finger-grippers, as used in industrial applications, do not fit the requirements of highly developed robot assistants. Artificial hands, as developed by several research groups in the last years, provides a lot of suitable technical solutions, but often they are too complex in terms of mechanics and control algorithms, too expensive and therefore not usable for real world products outside the lab.

In this context the goal of this thesis was to find approaches for flexible gripping systems with low complexity. The gripping system should be enable robot assistants to interact with their environment and to adapt to different situations regarding the handling of objects. To reach this goal the so called Finray-effect, a bionic principle for self adapting systems, was theoretical investigated, kinematics models and planning algorithms were developed and experiments were conducted to ensure the feasibility for the use in flexible gripping systems. At least the total gripping system should fit the requirements of robot assistants in a household environment.

Starting from the state of the art of robot assistants, industrial gripping systems and artificial hands three scenarios for robot assistants in household environments were defined, typical objects and boundary conditions were analysed and requirements to flexible gripping systems were derived. To analyse objects regarding their geometrical

features a method was developed to describe different shaped objects with basic geometrical forms such as cylinders and cubes. With this method a classification of the objects in different scenarios was possible. From this classification requirements to the necessary finger configuration of the gripping system were derived.

The requirements regarding the geometry and the minimum and maximum dimensions of the classified objects are important results from this analysis. From the classification the thesis that all objects can be handled with only three basis grips was formulated. Furthermore technical requirements regarding the integration of flexible hands in robot assistance were derived from an analysis of typical control architectures and robot arms.

For the four subsystems of flexible grippers such as the actuation, the control system, the configuration of the fingers and the finger system itself different concepts were developed. To reach a high degree of flexibility and keep the complexity of the total system as low as possible it was necessary to find rather new solutions for the configuration of the fingers and the finger kinematics. Concerning the configuration of the fingers an innovative solution consisting of three fingers was developed. This innovative concept comprises a thumb, which conduct no gripping movement, but enables a two- and a three-finger-grip by switching between two fixed positions. The two additional fingers are able to conduct independent gripping movements in the direction to the object. Furthermore they can be turned to fulfil a parallel movement in the one and a centric movement in the other configuration. With these features the hand is able to conduct a two-finger-, a three-finger-parallel- and a three finger-centric-grip. Regarding the finger system the above mentioned Finray-effect was compared with other possibilities to adapt to the geometry of the object. Three total gripping systems were derived from the developed sub systems and the meeting of the requirements was discussed.

Due to the lack of basic theoretical information about the Finray-effect in combination with flexible grippers the basic geometrical and kinematical coherences were developed. Therefore the kinematics of the Finray-effect was described as a set of links. Except the finger tip each link consists of two connected phalanxes. With this model it was possible to describe a finger which consists of any number of links. Based on this model equations which describe the movement of the finger and the resulting forces were developed. So the evaluation of different parameters of the finger, such as the number of links or the length of a link, regarding the possibilities and the limitations was possible. For the mechanical design of a specific finger these equations are also helpful.

To get information about the behaviour of the Finray-effect while gripping an object several simulations were conducted. With these simulations it was possible to show that the kinematics has a self-optimizing behaviour concerning the forces to the object. Furthermore a set of behaviour rules could be derived from the simulations.

Based on the developed mechanical model and the behaviour rules coming from the simulations an iterative algorithm was developed which delivers the resulting angles and forces between a finger and an object. Input to the algorithm was sensor data which represent the contour of an object as well as a set of parameters which describes the mechanical design of a finger. The output of the algorithm was the angles of the stable situation of finger and object as well as the contact forces between finger and object. The algorithm was at least evaluated by comparing calculated values with measured values from a developed test bed.

To investigate the feasibility of the developments two gripping systems were realized and evaluated regarding their possibilities and their limitations: The IPA-hand I and the IPA-hand II. IPA-hand I consists of two electrical drives which actuate the new finger configuration by means of an innovative gear concept. The fingers of the IPA-hand I are not adaptive to the object. The disadvantages of the IPA-hand I was the big size and a slow configuration of the different grips. The flexibility regarding different object shapes is good but doesn't fit all of the requirements to gripping systems for robot assistants. Therefore the IPA-hand II consists of three electrical drives and the self-adaptive finger kinematics. Both, the IPA-hand I and the IPA-hand II were controlled by a decentralized control unit which consists of an Ethernet interface to the robot controller of the robot assistant.

Experiments with the IPA-hand II show a very good flexibility regarding different object geometries. The very high spectrum of objects which can be handled and the low complexity of the IPA-hand II makes it very interesting for gripping devices of robot assistants.

10 Literaturverzeichnis

10.1 Bücher, Zeitschriften und Artikel

- /Ahn 2004a/ Ahn, Sung Joon: Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space. Berlin u.a. : Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science Vol. 3151). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2004
- /Ahn 2004b/ Ahn, Sung Joon; Effenberger, Ira; Stotz, Martin; Dunker, Thomas: Algorithmen zur Objekterkennung. In: Schraft, Rolf Dieter (Hrsg.) u.a.; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Objekterkennung in der Robotik: Technologien, Methoden, Anwendungen. 21.Oktober 2004, Stuttgart. Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2004, S. 79-88 (Fraunhofer IPA Workshop F 109).
- /Barth 2000/ Barth, Oliver: Miniaturisierter Schrittantrieb mit Piezoaktoren und Harmonic Drive Getriebe. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2000 (IPA-IAO Forschung und Praxis 326). Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2000
- /Birglen 2004/ Birglen, Lionel; Gosselin, Clement: Optimal Design of 2-Phalanx Underactuated Fingers. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Butterfaß 2001/ Butterfaß, J.; Hirzinger, G.; Grebenstein, M.; Liu, H.: DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea, 2001

- /Butterfaß 1999/ Butterfaß, Jörg: Eine hochintegrierte multisensorielle Vier-Finger-Hand für Anwendungen in der Servicerobotik. Aachen: Shaker, 2000 (Berichte aus der Robotik). Darmstadt, Techn. Hochsch., Fachber. Elektrotechnik und Informationstechnik, Diss. 1999
- /Butterfaß 1998/ Butterfaß, J.; Hirzinger, G.; Knoch, S.; Liu, H.: DLR's Multisensory articulated Part I: Hard- and Software Architecture. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, pp. 2081-2086
- /Caffaz 1998/ Caffaz, Cannata: The design and development of the DIST-hand Dexterous Gripper. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, pp. 2075-2080,
- /Cutkosky 1986/ Cutkosky, M. R.; Wright, P. K.: Modeling manufacturing grips and correlation with the design of robotic hands. In Proc. of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seiten 1533-1539, San Francisco, CA, 1986.
- /Eberhard 2004/ Eberhard, P.; Schiehlen, W.: Technische Dynamik – Modelle für Regelung und Simulation. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner 2004
- /Helms 2002/ Helms, Evert; Dünne, Markus; Hans, Matthias u.a.: rob@work: Assistentensysteme als Helfer in der Produktion. In: Robotik 2002: Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends. Düsseldorf: VDI Verlag, 2002, S. 661-667 (VDI-Berichte 1679)
- /Hering 1999/ Hering, E.; Vogt, A.; Bressler, K.: Handbuch der elektrischen Anlagen und Maschinen. Berlin: Springer, 1999
- /Hesse 2005/ Hesse, Stefan: Robotergreifer - Funktion, Gestaltung und Anwendung industrieller Greiftechnik. München, Wien: Hanser, 2005

- /Hägele 2001/ Hägele, Martin; Neugebauer, Jens-Günter; Schraft, Rolf Dieter: From Robots to Robot Assistants. In: Korea Institute of Science and Technology (KIST) u.a.: ISR 2001 - Vol. 1: Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics in conjunction with IMS 2001, 1st Intelligent Microsystem Symposium, April 19-21, 2001, Seoul, Korea. 2001, pp. 404-409
- /Haller 1998/ Haller, Thomas: Erfassen und Verarbeiten komplexer Geometrie in Meßtechnik und Flächenrückführung. Berlin u.a.: Springer, 1998 (IPA-IAO Forschung und Praxis 277). Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1998
- /Hans 2005/ Hans, Matthias: Eine modulare Kontrollarchitektur für den Hol- und Bringdienst von Roboterassistenten. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2005 (IPA-IAO Forschung und Praxis 412). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2005
- /Jacobsen 1986/ Jacobsen, S. C. et al: Design of the Utah/MIT Dexterous Hand. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986
- /Kawasaki 2001/ Kawasaki, H.; Shimomura, H.; Shimizu, Y.: Educational-industrial complex development of an anthropomorphic robot hand "Gifu hand". Advanced Robotics, Vol. 15, No. 3; 2001
- /Koganezawa 2004/ Koganezawa, Kochi: Artificial Finger with Shape-fitting Mechanism. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Koustoumpardis 2004/ Koustoumpardis, P. N.; Aspragathos, N. A.: A Review of Gripping Devices for Fabric Handling. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004

- /Kornbluh 1998/ Kornbluh, Roy u.a.: "Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators for biologically-inspired Robots". 1st NASA/JPL Workshop on Biomorphic Exploration. August 1998
- /Lawitzky 1999/ Lawitzky, Gisbert (Hrsg.); Grimm, Wolfgang (Hrsg.); Prassler, Erwin (Hrsg.); Weierich, Peter (Hrsg.); Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie: Intelligente Serviceumgebungen: INSERVUM - Verbundprojekt des BMBF. Aachen: Shaker, 1999
- /Ledermann 2004/ Ledermann, Thomas: Einsatz optischer Sensoren für die intelligente und flexible Handhabungstechnik. In: Schraft, Rolf Dieter (Hrsg.) u.a.; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Objekterkennung in der Robotik: Technologien, Methoden, Anwendungen, 21. Oktober 2004, Stuttgart. Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2004, S. 53-62
- /Lotti 2004/ Lotti, F.; Tiezzi, P.; Vassura, G.; Biagiotti, L.; Melchiorri, C.; Palli, G.: UBH 3: A Biologically Inspired Robotic Hand. In: Molino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Lotti 2002/ Lotti, F.; Vassura, G.: Design aspects for advanced Robots Hands: Mechanical design. In: Tagungsband "Towards Intelligent Robotic Manipulation", IROS 2002.
- /Lovchik 1999/ Lovchik, C. S.; Diftler, M. A.: The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand for Space, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1999, pp. 907-912
- /Martin 2004/ Martin, Eric; Desbiens, Alexis, Lussier; Laliberté, Thierry; Gosselin, Clement: SARAH Hand Used for Space Operations on STVF Robot. In: Molino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design. In: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004

- /Melchiorri 1992/ Melchiorri, C.; Vassura, G.: Mechanical and control features of the UB Hand Version II, In: IEEE-RSJ International Conference of Intellobots and Systems, IROS, 1992
- /Miller 2001/ Andrew T. Miller: Graspl!: A Versatile Simulator for Robotic Grasping. Dissertation, Columbia University, USA, 2001
- /Namiki 2004/ Namiki, Akio; Yoshiro, Imai; Kaneko, Makoto; Ishikawa, Masatoshi: Development of a High-speed Multifingered Hand System. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Napier 1956/ Napier, J.: The prehensile movements of the human hand. Journal of Bone and Joint Surgery, 38B(4) Seiten 902-913, 1956.
- /Nohmi 2004/ Nohmi, M.; Ando M.; Tsuji, T.: Tele-Manipulation by Force Reflected Operation Under Communication Time Delay. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping, Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Reichel 2004/ Reichel, M.: Transformation of Shadow Dextrous Hand and Shadow Finger Test Unit from Prototype to Product for Intelligent Manipulation and Grasping. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Rodríguez 2004/ Rodríguez, N.; Carbone, G., Ottaviano, E.; Ceccarelli, M.: An Experimental Validation of a Three - Fingered Hand With 1 DOF Anthropomorphic Fingers. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping. Genova, Italy, 1-2 July, 2004

- /Roth-Koch 2004/ Roth-Koch, Sabine: The reverse engineering technology form determination and form profiling in the product development. In: Harbour Conferences: 3D Modelling 2005 - NUM 3D : The 10th International rendezvous for 3D digitisation and modelling professionals. Proceedings books. 27-28 September 2005, Paris. Dinard, Frankreich, 2005, 8 S.
- /Salisbury 1983/ Salisbury, K. S.; Roth, B.: Kinematics and force analysis of articulated mechanical hands. In: Journal of Mechanisms, Transmissions and Actuation in Design, No. 105, 1983
- /Schaeffer 1999/ Schaeffer, Christoph; May, Till: Care-O-bot™: A System for Assisting Elderly or Disabled Persons in Home Environments. In: Assistive Technology on the Threshold of the New Millennium, Proc. AAATE 99, 1.-4.11.1999, Düsseldorf / Bühler, Christian (Hrsg.). Amsterdam u.a.: IOS Press, 1999, S. 340-345
- /Schraft 2004/ Schraft, Rolf Dieter; Hägele, Martin; Wegener, Kai; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Service Roboter Visionen. München; Wien: Hanser, 2004
- /Schraft 1996/ Schraft, Rolf Dieter; Volz, Hansjörg: Serviceroboter: innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung. Berlin u.a.: Springer, 1996
- /Schulz 2004/ Schulz, S.; Pylatiuk, C.; Kargov, A.: Determination of holding forces of artificial robotic hands. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping, Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Schulz 2001/ Schulz, S.; Pylatiuk, C.; Bretthauer, G.: A new ultralight anthropomorphic hand, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea, 2001
- /Seegräber 1993/ Seegräber, Ludwig: Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter: Grundlagen, Erfahrungen, Einsatzbeispiele. Ehningen: Expert Verlag, 1993

- /Suárez 2004/ Suárez, Raúl; Grosch, Patrick: Dexterous Robotic Hand MA-I - Software and Hardware Architecture. In: Molfino, Rezia; University of Genova, Department of Mechanics and Machine Design: Intelligent Manipulation and Grasping, Genova, Italy, 1-2 July, 2004
- /Townsend 2000/ Townsend, W. T.: MCB - Industrial robot feature articulated Barrett Hand grasper. In: Industrial Robot. Vol. 27, No. 3, 2000
- /Wegener 2005a/ Schraft, R.D.; Wegener, K.; Simons, F.; Pfeiffer, K.: Intelligent Sensor System and Flexible Gripper for Security Robots. In: CLAWAR 2005: Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 15-17 September 2005, London, UK
- /Wegener 2005b/ Wegener, Kai: Flexibles Greifen von Bauteilen: Ein technischer Ansatz zur Wandlungsfähigkeit bei der Produktion von variantenreichen Bauteilen. In: Wt Werkstattstechnik 95 (2005), 3, S. 91-96
- /Wegener 2005c/ Wegener, Kai: Mit drei Fingern alles im Griff: Flexible 3-Finger-Hand mit nur zwei elektrischen Aktoren reagiert auf sich ändernde Objektgeometrien. In: MM - Das IndustrieMagazin 111 (2005), 27, S. 154-156
- /Wegener 2004a/ Schraft, Rolf Dieter; Wegener, Kai: Greifen geometrievarianter Objekte. In: VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik (GMA) u.a.: Robotik 2004 : Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends. Tagung München, 17. und 18. Juni 2004. Düsseldorf : VDI Verlag, 2004, S. 117-124
- /Wegener 2004b/ Abschlussbericht zum Verbundprojekt „Greifsysteme der Zukunft“ gefördert vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg aus Mitteln der Landesstiftung. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung: Stuttgart, 2003.

- /Wegener 2003/ Wegener, Kai; Ledermann, Thomas; Schraft, Rolf Dieter: Ein Baukastensystem für die intelligente Handhabungstechnik. In: Automatisierungstechnische Praxis 45 (2003), 11, S. 36-39
- /Wegener 2002/ Wegener, Kai; Simons, Florian; Schraft, Rolf Dieter: Intelligente Greifsysteme zur Erhöhung der Flexibilität bei Handhabungsaufgaben im Bereich der Robotik. In: Dillmann, Rüdiger (Tagungsleitung) u.a.; VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik (GMA) u.a.: Robotik 2002 : Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends. Tagung Ludwigsburg, 19. und 20. Juni 2002. Düsseldorf : VDI Verlag, 2002, S. 395-400 (VDI-Berichte 1679).
- /Westkämper 2001/ Westkämper, Engelbert: Mehr Intelligenz in der Maschine. Technische Intelligenz und Miniaturisierung im Maschinen- und Anlagenbau. In: F&M 109 (2001) 10, S. 75-77
- /Wolf 2004/ Wolf, Andreas; Steinmann, Ralf: Greifer in Bewegung: Faszination der Automatisierung von Handhabungsaufgaben. München, Wien: Hanser, 2004
- /Wühlke 1991/ Wühlke, G.: Wissensbasierte Greifplanung für Mehrfinger-Roboterhände. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1991
- /World Robotics 2005/ United Nations / Economic Commission for Europe; International Federation of Robotics: World Robotics 2005 - Statistics: Market Analysis, Case Studies and Profitability of Robot Investment. New York; Geneva: United Nations Publications, 2005

10.2 Internetseiten

/Aftag 2005/	Homepage der AFT – Adv. Feeding Technologies AG, Cham, CH. URL: www.aftag.ch , Stand 10/2005
/Festo 2005/	Homepage der Festo AG, Esslingen, D. URL: www.festo.com , Stand 10/2005
/Fipa 2005/	Homepage der FIPA GmbH, Ismaning, D. URL: www.fipa-online.com , Stand 10/2005
/Fujitsu 2004/	Homepage der Fujitsu Automation Ltd., Kamikodanaka, JP. URL: http://www.fujitsu.com/global/about/rd/200506hoap-series.html , Stand 10/2005
/Goudsmit 2005/	Homepage der Goudsmit Magnetics Groep B.V., Waalre, NL. URL: www.goudsmit-magnetics.nl , Stand 10/2005
/Hitachi 2005/	Homepage der Hitachi Ltd., Tokyo, Japan. URL: http://www.hitachi.com/New/cnews/050714.html Stand, 10/2005
/Honda 2005/	Homepage der Honda Motors Co. Ltd., Tokyo, Japan. URL: http://world.honda.com/ASIMO/ , Stand 10/2005
/IPA 2005/	Homepage des Care-O-bot II des Fraunhofer IPA, Stuttgart, D. URL: www.care-o-bot.de , Stand 10/2005
/IPR 2005/	Homepage der IPR - Intelligente Peripherien für Roboter GmbH, Schwaigern, D. URL: www.ipr-worldwide.de , Stand 10/2005
/Mitsubishi 2004/	Homepage der Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Tokyo, Japan http://www.mhi.co.jp/kobe/wakamaru/english/index.html Stand, 10/2005
/Naiss 2005/	Homepage der Naiss GmbH, Berlin, Deutschland, URL: www.naiss.de , Stand 10/2005

- /Schmalz 2005/ Homepage der J. Schmalz GmbH Förder- und Handhabungstechnik, Glatten, D. URL: www.schmalz.de, Stand 10/2005
- /Schunk 2005/ Homepage der Schunk GmbH & Co. KG Spann- und Greiftechnik, Lauffen, D. URL: www.schunk.de, Stand 10/2005
- /Sommer 2005/ Homepage der Sommer-automatic GmbH & Co. KG., Ettlingen, D. URL: www.sommer-automatic.de, Stand 10/2005

10.3 Schutzrechte

- /Kniese 2003a/ Europäisches Patent EP 1 316 651 A2: Bauteil zur Aufnahme von Kräften mit einer flexiblen Außenhaut. Kniese, Leif, Berlin.
- /Kniese 2003b/ Europäisches Patent EP 1 203 640 A3: Vorrichtung zur Aufnahme von Kräften mit einer flexiblen Außenhaut. Kniese, Leif, Berlin.
- /Wegener 2005d/ Deutsche Patentanmeldung 10 2005 010 380.4: Greifwerkzeug mit selbstadaptiver Kinematik. Wegener, Kai; Simons, Florian; Becker, Ralf; Stuttgart.
- /Wegener 2004c/ Deutsche Patentanmeldung 10 2004 022 201.0-15: Greifvorrichtung zur flexiblen Handhabung von Objekten. Wegener, Kai; Simons, Florian; Stuttgart.

