

Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau, Studiengang Maschinenbau

Institut für Roboterforschung

und

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart

Diplomarbeit

**Konzeption und Entwicklung von roboter-
geführten Werkzeugsystemen zur Fertigung von
Holzbauteilen in kleinen Losgrößen**

von

Hendrik Mütherich

Betreuer: Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Kai Wegener (IPA)

Ausgegeben am 1. September 2005

Eingereicht am 31. Dezember 2005

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	2
Formelzeichen und Abkürzungen	5
1 Einleitung	7
1.1 Aufgabenstellung.....	7
1.2 Zielsetzung	7
1.3 Vorgehensweise	8
2 Ausgangssituation.....	9
2.1 Das Forschungsprojekt SMErobot.....	9
2.2 Stand der Technik in der industriellen Robotik.....	10
2.2.1 Definition Roboter.....	10
2.2.2 Kinematiken und Arbeitsräume	10
2.3 Stand der Technik von Holzbearbeitungsmaschinen	13
2.4 Stand der Technik flexibler Greifsysteme.....	15
2.4.1 Definition Greifer.....	15
2.4.2 Teilsysteme eines Greifers	16
2.4.3 künstliche Hände	18
2.4.4 Flexible Greifsysteme	19
2.5 Sauggreifer	21
2.5.1 Vakuumerzeuger	21
2.5.2 Saugnäpfe	23
3 Analyse der Randbedingungen für die zu entwickelnden Werkzeuge und	
Ableitung von Anforderungen für die Konstruktion	27
3.1 Analyse handelsüblicher Akkuboehrschrauber hinsichtlich ihrer.....	
Eignung zur automatisierten Fertigung.....	27
3.1.1 Vorgehensweise	27
3.1.2 Aufnahme des Werkzeuges in einer robotergeführten Vorrichtung.....	27
3.1.3 Definition von Teilsystemen.....	28
3.1.4 Trägersystem.....	29
3.1.5 Spannsystem.....	30
3.1.6 Betätigungssystem	34
3.1.7 Werkzeugsteuerung und Sensorik	35

3.1.8	Anforderungsliste.....	36
3.2	Analyse der Greifaufgabe des flexiblen Greifsystems.....	38
3.2.1	Vorgehensweise	38
3.2.2	Definition der Teilsysteme	38
3.2.3	Greifobjekte	39
3.2.4	Vorgaben zur Greiferbauart.....	40
3.2.5	Randbedingungen beim Greifen.....	42
3.2.6	Ableitung von Anforderungen an Teil- und Gesamtsysteme	43
3.2.7	Anforderungsliste.....	46
3.3	Analyse der Greifaufgabe der Saugspinne.....	46
3.3.1	Saugspinne und Komponenten	46
3.3.2	Analyse der Greifobjekte	48
3.3.3	Anforderungen an Teil- und Gesamtsysteme und Anforderungsliste	48
4	Konzeption und Entwicklung einer Vorrichtung zur Aufnahme von	
	Akkuschraubern	50
4.1	Vorgehensweise	50
4.2	Konzeption des Spannsystems	50
4.2.1	Aufbringen der Spannkraft.....	50
4.2.2	Erzeugen der Spannkraft.....	52
4.2.3	Sicherung gegen Verdrehen.....	54
4.3	Konzeption des Trägersystems	55
4.4	Konzeption des Betätigungssystems.....	56
4.5	Konzept der Werkzeugsteuerung und Sensorik.....	58
4.6	Auswahl und Auslegung der Komponenten	60
4.7	Konstruktion der Vorrichtung	62
4.7.1	Gemeinsamkeiten der Varianten	62
4.7.2	Variante 1: Federspannung	62
4.7.3	Variante 2: Schraubenspannung	64
5	Konzeption und Entwicklung eines flexiblen Greifers zur Handhabung	
	kleiner und mittlerer Objekte variabler Geometrie	66
5.1	Vorgehensweise	66
5.2	Konzeption des kinematischen Systems	66
5.3	Konzeption des Antriebssystems	70
5.3.1	Fingerzylinder	70
5.3.2	Daumenzylinder und Schwenkzylinder.....	71
5.4	Konzeption des Wirksystems	72
5.5	Konzeption des Informationsverarbeitungssystems	72

5.6	Konzeption des Trägersystems	73
5.7	Auslegung und Auswahl der Komponenten	73
5.8	Konstruktion	74
6	Entwurf und Dimensionierung einer Saugspinne zur Handhabung flächiger Objekte.....	77
6.1	Anordnung der Saugnäpfe	77
6.2	Berechnung des Saugnapfdurchmessers	77
6.3	Auslegung und Auswahl der Komponenten	78
7	Integration der Werkzeuge in eine Roboterzelle.....	81
7.1	Definition der Teilsysteme und Auswahl der Komponenten	81
7.2	Layoutplanung.....	83
7.3	Überprüfung der Reichweite und Kollisionsbetrachtung.....	84
8	Erprobung des Bohrwerkzeugs.....	85
8.1	Versuchsaufbau	85
8.2	Versuchsdurchführung	86
8.3	Versuchsergebnisse	88
8.4	Folgerungen	90
9	Zusammenfassung und Ausblick	91
	Quellenverzeichnis.....	93
	Abschlussklärung.....	96

FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Lateinisch

a	Beschleunigung
a_{\max}	maximale Beschleunigung
A_D	Dichtfläche
A_W	Wirkfläche
b	Breite
b_K	Breite der Profilkammern
BF	Bohrfutter
D_A	Außendurchmesser
d_F	Abstand von der Mittelachse
d_M	Verstellweg der Drehachsen
D_W	wirksamer Durchmesser
F_D	Anpresskraft
F_G	Greifkraft
$F_{G\min}$	minimale Greifkraft
F_n	Maximalkraft einer Feder
F_R	Reibkraft
F_S	Saugkraft
F_{ZS}	Kraft des Schwenkzylinders
G	Gravitationskraft
h	Höhe
h_D	(Hilfswert bei der Greiferberechnung)
h_k	Höhe der Profilkammern
h_{ZD}	Hub des Daumenzylinders
h_{ZS}	Hub des Schwenkzylinders
k_E	spezifische Generatorspannung
l	Länge
l_{AR}	Armlänge eines Roboters
$l_{K,\text{ges}}$	Gesamtlänge der Profilkammern
l_n	Mindestlänge einer Feder
l_Z	Länge der Zugriffsbewegung

MA	Abstand von der Mittelachse des Bohrschraubers
M_{0x}	Moment um die x-Achse
M_{0y}	Moment um die y-Achse
m_{Pl}	Masse einer Holzplatte
n_B	Drehzahl des Bohrschraubers
n_S	Anzahl der Saugnäpfe
p_{At}	atmosphärischer Umgebungsdruck
p_W	Absolutdruck im Wirkraum
r_F	Greiffingerradius
R_f	Federrate
r_O	Objektradius
s	Sicherheitsfaktor
s_{Sa}	Sicherheitsfaktor der Saugspinne
t_{ev}	Evakuierungszeit für einen Normliter
$t_{ev,Sa}$	Evakuierungszeit der Saugspinne
TCP	Tool Center Point
v_B	Vorschub des Bohrschraubers
V_{ev}	zu evakuierendes Saugspinnenvolumen
$V_{K,ges}$	Gesamtvolumen der Profilkammern
V_S	Innenvolumen eines Saugnapfs
$V_{S,ges}$	Gesamtvolumen der Saugnäpfe

Griechisch

α	Schwenkwinkel
β	(Hilfswert bei der Greiferberechnung)
γ	Greifwinkel
Δp	Druckdifferenz
μ_H	Haftreibungskoeffizient
ρ	Dichte
ω_{Rmax}	maximale Winkelgeschwindigkeit

1 EINLEITUNG

1.1 Aufgabenstellung

Um die Robotik für Anwendungen in der klassischen Werkstattfertigung, d.h. die Fertigung von kleinen Losgrößen oder Einzelstücken einzusetzen, muss sie schnell und flexibel auf geänderte Randbedingungen und Produkte reagieren können. Im Forschungsprojekt SMErobot, welches von der EU im Rahmen des sechsten Forschungsprogramms gefördert wird, hat sich ein internationales Konsortium zum Ziel gesetzt, die damit einhergehende Aufgabenstellung zu lösen. Schwerpunkte dieses Programms liegen im Bereich intuitive Bedienung und Programmierung, Sicherheit im direkten Umgang mit Robotern und Wandlungsfähigkeit von Robotersystemen.

Um Roboter wandlungsfähig zu machen, ist es notwendig, alle benötigten Teilsysteme weitgehend modular zu gestalten. In dieser Arbeit sollen Werkzeuge entwickelt werden, die diesem Aspekt der Modularität für ein ausgewähltes Einsatzszenario gerecht werden.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Diplomarbeit ist die Entwicklung von Werkzeugen für die Prozesse Bohren, Handhaben und Fügen eines Holzdübels sowie Handhaben von Holzplatten. Bei der Entwicklung soll auf Geräte, wie sie üblicherweise in Schreinereien vorkommen, zurückgegriffen werden. Zur mechanischen Integration wird ein Werkzeugwechselsystem eingesetzt. Zur steuerungstechnischen Integration müssen jeweils eine dezentrale Werkzeugsteuerung und entsprechende Sensoren zur Überwachung des Prozesses integriert werden. Abschließend soll in Versuchen die Funktionalität der entwickelten Werkzeuge gezeigt werden.

1.3 Vorgehensweise

Zum Erreichen der Zielsetzung soll wie folgt vorgegangen werden:

Im ersten Schritt werden Handwerkzeuge zur Holzbearbeitung hinsichtlich automatisierungstechnischer Aspekte wie Gewicht, Kräfte und Momente, benötigte Medien etc. analysiert. Weiterhin sollen Sensoren zur Überwachung der auftretenden Prozessparameter ermittelt und analysiert werden.

Im Folgenden werden plug-and-play-fähige Werkzeuge zur Holzbearbeitung auf Basis der, aus der Analyse abgeleiteten Anforderungen konzipiert. Schwerpunkte liegen hierbei auf der automatisierungsgerechten Integration der Komponenten für den eigentlichen Prozess, der Steuerung und gegebenenfalls zusätzlicher Aktoren und Sensoren. Steuerungstechnische Aspekte, wie die Programmierung der Werkzeuge oder die Auswahl geeigneter Steuerungen, werden nur am Rande betrachtet.

Daraufhin sollen die Werkzeuge unter Verwendung von handelsüblichen Handwerkzeugen, wie z.B. Akkuschrauber oder Bohrmaschine entwickelt und realisiert werden. Mittels CAD-System sollen entsprechende Vorrichtungen konstruiert werden.

Abschließend sollen die Werkzeuge aufgebaut und in eine Roboterzelle integriert werden. Zur Erprobung der Werkzeuge sollen Bohrversuche durchgeführt und die Qualität der Bohrlöcher bewertet werden.

2 AUSGANGSSITUATION

2.1 *Das Forschungsprojekt SMErobot*

Automatisierung wird eingesetzt, um ein Unternehmen wettbewerbsfähiger zu machen. Marktübliche Lösungen sind für viele kleine und mittlere Unternehmen (kmU, englisch SME) allerdings immer noch zu teuer. Dies soll durch SMErobot geändert werden. Das EU-Projekt entwickelt eine neue modulare und interaktive Robotergeneration, die schnell zu installieren und leicht zu bedienen ist und durch ihre kostengünstige Auslegung die Wettbewerbspotenziale der Automatisierungstechnik für kleine und mittelständische Unternehmen erschließen soll [SME05].

Drei Ziele soll die von SMErobot entwickelte neue Robotergeneration erfüllen, um den spezifischen Anforderungen in mittelständischen Unternehmen Rechnung zu tragen: Der Roboter soll leicht erlernbare, intuitive Befehle verstehen, er soll alle Sicherheitsvoraussetzungen erfüllen, um den Arbeitsplatz mit menschlichen Kollegen zu teilen, und er soll binnen drei Tagen installiert und in Betrieb genommen werden können. Durch die flexible Kombination von einzelnen Modulen sollen die Investitions- und Betriebskosten auf ein Drittel gesenkt werden [SME05].

SMErobot beschränkt sich dabei nicht auf die Entwicklung der Hard- und Software; auch die Entwicklung neuer, mittelstandsgerechter Investitions- und Finanzierungsmodelle und die Integration der Robotertechnik in Fertigungsabläufe und Prozessketten ist Bestandteil des Projekts. Pilotversuche mit mittelständischen Unternehmen aus den Bereichen Gießereitechnik, Maschinenbau, Metall- und Holzbearbeitung sind bereits geplant. Das Projekt steht aber prinzipiell für kleine und mittelständische Unternehmen in allen bedeutenden Branchen des produzierenden Gewerbes offen [SME05].

2.2 Stand der Technik in der industriellen Robotik

2.2.1 Definition Roboter

Die VDI-Richtlinie 2860 definiert den Begriff Roboter folgendermaßen:

Ein Roboter ist ein universell einsetzbarer Bewegungsautomat mit mehreren Achsen, dessen Bewegungen hinsichtlich Folge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar (d.h. ohne mechanischen Eingriff) und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben erfüllen [VDI90].

Tatsächlich stellen moderne Industrieroboter extrem flexible High-Tech Geräte dar, die für viele Anwendungsfälle benutzt werden können. Die Flexibilität erlaubt auch das Fertigen kleiner Losgrößen oder die Handhabung von Varianten auf einer Fertigungsstraße mit ein und demselben Gerät [Kre03].

2.2.2 Kinematiken und Arbeitsräume

Die gängigsten Industrieroboterkinematiken und die sich daraus ergebenden Arbeitsräume bzw. Bewegungskordinaten von verschiedenen Robotermodellen zeigt Abbildung 1. Sie ergeben sich aus der Kombination unterschiedlicher rotatorischer und translatorischer Achsen [Kre03].

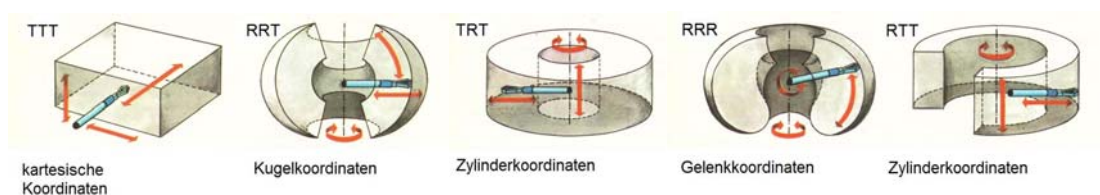


Abbildung 1: Roboterkinematiken und Arbeitsräume [SBS05]

2.2.2.1 Linearkinematik

Bei den Linearkinematiken werden die Hauptbewegungen nur durch gerade Verfahrwege hervorgerufen. Die Vorteile der dazu eingesetzten translatorischen Achsen sind zum einen geringe Anforderungen an das räumliche Vorstellungsvermögen des Programmierers und zum anderen, dass beim Verfahren in

kartesischen Achsen keine Koordinatentransformation erforderlich ist, was den Rechenaufwand in der Steuerung reduziert [Kre03].

Demgegenüber stehen erhebliche Nachteile wie z.B. großer Platzbedarf und Kollisionsraum, niedrige Arbeitsgeschwindigkeit oder technische Anforderungen wie Abdeckung der Führungsbahnen. Hauptanwendungsgebiete sind das Be- und Entladen schwerer oder sperriger Teile, Beschicken und Verketteten von Werkzeugmaschinen, Palettieren oder das Schweißen großer flacher Teile. Zum Einsatz kommen Ausleger und Portalroboter. Der Aufbau ist sehr stabil und die Geräte sind sehr robust, weshalb sie Traglasten von 250 kg und mehr problemlos bewältigen können. Die in Abbildung 2 dargestellten Kinematiken haben einen quaderförmigen Arbeitsraum [Kre03].



Abbildung 2: Portalroboter (links) [ABB05] und Ausleger (rechts) [INT1]

2.2.2.2 Gelenkinematik

Werden nur rotatorische Achsen eingesetzt, entstehen die so genannten Knickarmgeräte. Sie zeichnen sich durch sehr große Verstellbereiche aus und erlauben eine optimale Orientierungsmöglichkeit für den Greifer. Im Allgemeinen haben sie einen nahezu globoiden (kugelförmigen) Arbeitsraum. Die vielseitigen Bewegungsmöglichkeiten beschenken diesem Robotertyp ein breites Einsatzspektrum von Maschinenbeschickung über das Lackieren oder Schweißen bis zur Montage. Derzeit ist dies der am häufigsten angewendete Robotertyp. In Abbildung 3, auf der nächsten Seite, ist ein solches Gerät gezeigt. Die mathematische Abbildung der Bewegung ist für jede Achse in Matrizen zusammengefasst, was den Nachteil einer erhöhten Anforderung an die Steuerung (Koordinatentransformation notwendig) beinhaltet [Kre03].



Abbildung 3: Sechs-Achs-Knickarmroboter [SEF05]

2.2.2.3 Kombination von Rotations- und Translationsachsen

Durch Kombination von Rotations- und Translationsachsen können positive Eigenschaften verschiedener Kinematikkonzepte verstärkt werden. Ein klassischer Anwendungsfall ist die SCARA-Konfiguration (Abbildung 4), eine spezielle Entwicklung für die Montage. Der Arbeitsraum ist bei dieser kinematischen Kette zylindrisch. Die Rotationsachsen sind in der x/y-Ebene nachgiebig und können Positioniergenauigkeiten ausgleichen. Trotzdem sind die Gelenke in z-Richtung sehr steif, wodurch auch höhere Fügekräfte aufgebracht werden können. Mit den vier Achsen kann der SCARA-Roboter senkrechte Fügebewegungen von oben nach unten, wie es in den meisten Montageanwendungen der Fall ist, bewerkstelligen. Der einfache Aufbau und die hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit zusammen mit der Schnelligkeit begründen den Erfolg dieser Roboterklasse [Kre03].



Abbildung 4: SCARA-Roboter [INT2]

2.2.2.4 Parallelkinematik

Die neueren Entwicklungen im Bereich der Parallelkinematiken zählen zu den geschlossenen Kinematiken. Hierzu gehören Hexapoden (Abbildung 5 links) und

Tricept-Einrichtungen (Abbildung 5 rechts). Diese Maschinen finden in der industriellen Fertigung Verwendung. Gründe dafür liegen in der außergewöhnlich geringen Nachgiebigkeit dieser Geräte [Kre03].

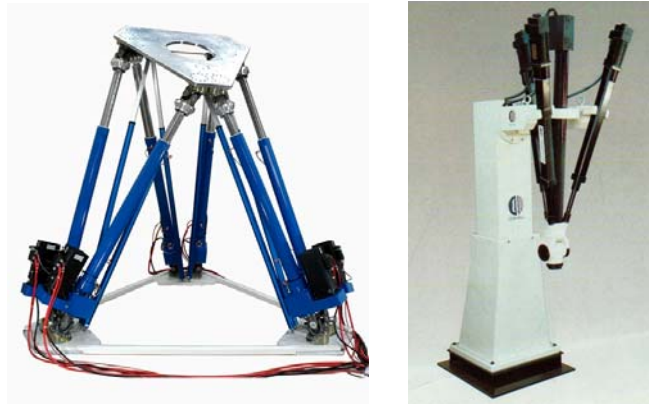


Abbildung 5: Hexapode (links) [INT3] und Tricept (rechts) [INT4]

Bei Hexapod-Strukturen ist das eine Ende von Streben mit Hilfe von Gelenken an einer festen Plattform befestigt. Das andere Ende der Streben ist wiederum über Gelenke an einer beweglichen Plattform montiert. Die Gelenke verfügen über mehrere Drehfreiheitsgrade. Die Streben können in ihrer Länge veränderlich sein, wobei durch die Längenänderung der Streben die bewegliche Plattform in allen sechs Freiheitsgraden im Raum positionierbar ist [Kre03].

Die Grundmaschine eines Tricept ist ein Tripode mit drei Grundachsen. Die Teleskopbeine sind durch eine entsprechende Vorspannung spielfrei. Jedes Bein ist auf der von der Bearbeitung abgewandten Seite ebenfalls spielfrei kardanisch gelagert. Die bearbeitungsseitigen Gelenke sind kugelgelagert mit drei Freiheitsgraden. Die im Zentrum der Maschine angeordnete Säule fängt bei der Bearbeitung entstehende Biegemomente ab. In dem Punkt, in dem die Säulen zusammentreffen, schließen sich die drei (rotatorischen) Handachsen der Kinematik an [Kre03].

2.3 Stand der Technik von Holzbearbeitungsmaschinen

Bei Holzbearbeitungsmaschinen ist zwischen zwei grundsätzlich unterschiedlichen Bauformen zu unterscheiden: stationäre Bearbeitungsmaschinen (Bearbeitungszentren und NC-Oberfräsen), die wegen ihrer Flexibilität vorwiegend zur Produktion kleiner Stückzahlen eingesetzt werden und Durchlaufmaschinen (z.B. Formatbearbeitungsmaschinen und Kehlautomaten), mit denen in der Regel in größeren Stückzahlen produziert wird [Hes00].

Im Folgenden wird auf die Durchlaufmaschinen wegen ihrer geringen Flexibilität nicht näher eingegangen.

Die Leistungsfähigkeit der heute am Markt verfügbaren Holzbearbeitungsmaschinen wird im Wesentlichen durch die eingesetzten Hauptspindeln und Antriebskomponenten bestimmt. Zwar erreichen moderne Bearbeitungszentren Achsgeschwindigkeiten bis zu 80 m/min, jedoch sind diese Geschwindigkeiten unter Berücksichtigung der erzielbaren Werkstückqualität nicht auf den Arbeitsvorschub übertragbar. Dieser liegt abhängig von der Bearbeitungsaufgabe derzeit zwischen 20-30 m/min [Hes00].

Höhere Vorschubgeschwindigkeiten bei gleich bleibend hohem Qualitätsniveau sind derzeit nur in Verbindung mit höheren Schnittgeschwindigkeiten zu erzielen. Die Drehzahl konventioneller Spindeln für Bearbeitungszentren liegt in einem Bereich zwischen 18.000 bis 24.000 min^{-1} [Hes00].

Aus der Summe der am Markt verfügbaren Bearbeitungszentren ergibt sich folgender Überblick:

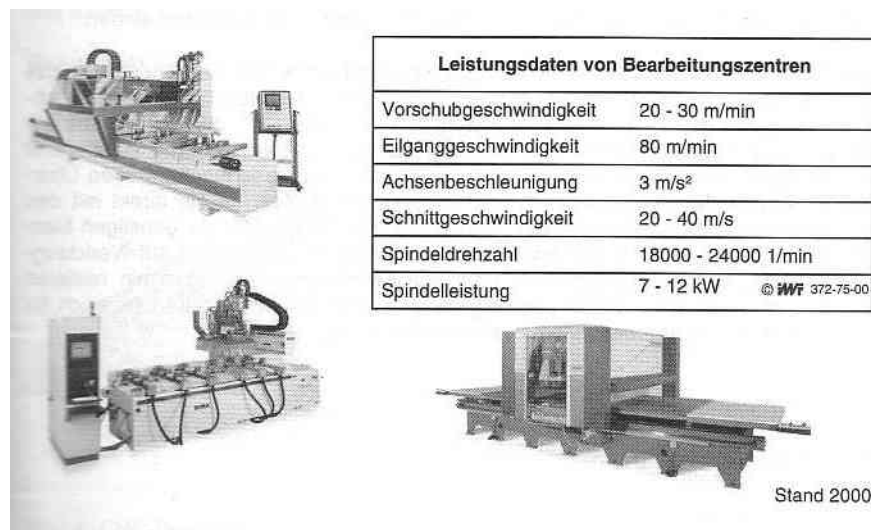


Abbildung 6: Überblick Bearbeitungszentren [Hes00]

Neben den herkömmlichen Bearbeitungszentren werden seit einiger Zeit auch andere Kinematiken für die Holzbearbeitung eingesetzt. Auf der LIGNA 99 wurde die erste, vorwiegend für Holzbearbeitungsaufgaben konzipierte Hybridmaschine vorgestellt. Der BIMA Tricept besteht aus den für dieses Konzept üblichen drei Schubstangen an die zwei Rotationsachsen für die Spindelorientierung angekoppelt sind. Dadurch lassen sich Bahngeschwindigkeiten von 60 m/min und Beschleunigungen von 1 g erreichen [Hes00].

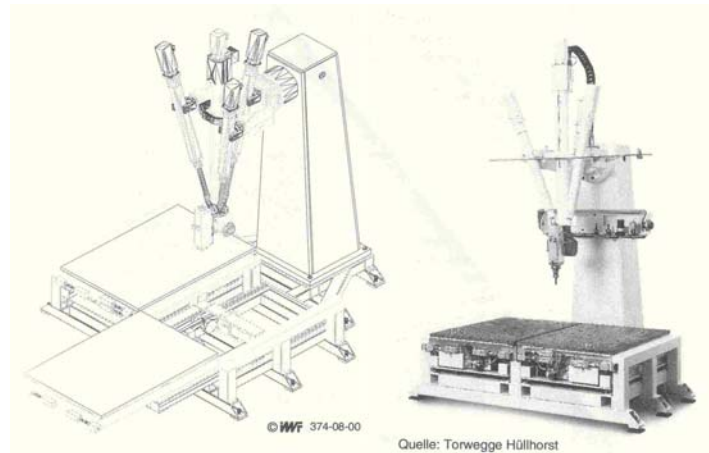


Abbildung 7: Tricept zur Holzbearbeitung [Hes00]

2.4 Stand der Technik flexibler Greifsysteme

2.4.1 Definition Greifer

Nach der VDI-Richtlinie 2740 sind die Hauptaufgaben eines Greifers das Herstellen, Aufrechterhalten und Lösen der Verbindung zwischen dem Greifobjekt und dem Handhabungsgerät. Das Handhabungsgerät dient dem Positionieren und Orientieren des Greifers mit oder ohne Greifobjekt durch eine allgemeine räumliche Bewegung. Je nach Anwendungsfall können für den Greifer zusätzliche Sonderfunktionen hinzukommen wie:

- ♦ Änderung der Position des Werkstücks
- ♦ Änderung der Orientierung des Werkstücks
- ♦ Informationsaufnahme durch Sensoren (Anwesenheitskontrolle und Lageerkennung für Werkstücke, Kraft-, Moment- und Wegmessung)
- ♦ Teilebereitstellung bei der Montage (z.B. Schraubenzuführung), Reinigungsfunktionen in Fertigungsprozessen [VDI95].

Zur Erfüllung seiner Aufgaben muss der Greifer Kräfte und Momente ausüben bzw. aufnehmen. Dazu gehören:

- ♦ das Ausüben der Kräfte und Momente zum Erfassen des Handhabungsobjektes und zum vorübergehenden Aufrechterhalten einer definierten Zuordnung zwischen dem Objekt und der Greifeinrichtung
- ♦ das Aufnehmen statischer Kräfte und Momente, die durch das Handhabungsobjekt hervorgerufen werden, z.B. die Gewichtskraft
- ♦ das Aufnehmen dynamischer Kräfte und Momente, die im Zusammenhang mit einer Bewegung auftreten, z.B. Trägheitskräfte und -momente
- ♦ das Aufnehmen prozessbedingter Kräfte und Momente, z.B. Anpress-, Füge- und Bearbeitungskräfte und –momente [VDI95].

Nach Bauer [Bau02] sind Greifer – im Gegensatz zu antropomorphen Systemen, deren Ziel es ist, die menschliche Hand sowohl in der Form als auch in der Funktion nachzubilden – jedoch nicht dazu in der Lage, das Handhabungsobjekt zu manipulieren, d.h. die Position oder Orientierung in Bezug auf das Greiferkoordinatensystem zu verändern. Den Ursprung des Greiferkoordinatensystems bezeichnet man als TCP (Tool Center Point), auf den sich alle programmierbaren Bewegungsfunktionen beziehen.

2.4.2 Teilsysteme eines Greifers

Nach VDI 2740 sind Greifsysteme aus unterschiedlichen Teilsystemen aufgebaut, die den verschiedenen Merkmalen der speziellen Greifaufgabe gerecht werden müssen. Ein Greifer besteht aus:

- ♦ dem Wirksystem
- ♦ dem kinematischen System
- ♦ dem Trägersystem
- ♦ dem Informationsverarbeitungssystem
- ♦ dem Antriebssystem [VDI95].

2.4.2.1 Wirksystem

Das Wirksystem ist der Teil der Greifeinrichtung, der das Greifobjekt berührt und die Greifkraft überträgt. Es gibt demnach Wirkstellen sowohl am Greifer (Greiffläche, aktive Wirkfläche) als auch am Greifobjekt (Grifffläche, passive Wirkfläche). Die Wirkstellen am Greifer sind so zu gestalten und auf die des Greifobjektes abzustimmen, dass Position und Orientierung des Greifobjektes gegenüber dem Greifer vorübergehend gesichert sind und Kräfte übertragen werden können. Die Anzahl und Anordnung der theoretischen Berührungspunkte zwischen Greifer und Greifobjekt bestimmen die Stabilität des Griffes. Die Anzahl der Berührungspunkte muss umso größer sein je empfindlicher das Greifobjekt gegen große Spannkkräfte ist. Dazu können die Greiferwirkflächen anpassungsfähig, d.h. gelenkig, elastisch oder abformfähig gestaltet sein [VDI95].

2.4.2.2 Kinematisches System

Das kinematische System dient der Bewegungs- und Kraftübertragung zwischen Antriebs- und Wirksystem des Greifers. Für die Umwandlung der rotatorischen oder translatorischen Antriebsbewegung in eine Abtriebsbewegung der Greiforgane (Greifglieder) mit den Wirkelementen während der Schließ-, Spann- und Öffnungsphase des Greifers steht eine Vielzahl von Greifergetrieben mit unterschiedlichen Übertragungsfunktionen zur Verfügung. Greiforgane sind die durch das Greifergetriebe bewegten Glieder, mit denen die Wirkelemente unbeweglich (starr) oder beweglich gekoppelt sind. Eine weitere Anforderung kann auch die Aufrechterhaltung der Greifkraft bei einem Ausfall der Antriebsenergie sein (Notausverhalten) [VDI95].

2.4.2.3 Trägersystem

Das Trägersystem ist das Gestell des Greifers, das die Verbindung zwischen Greifer und dem Endglied des Greiferführungsgetriebes schafft. Es überträgt Kräfte und Momente zwischen dem Greifer und dem Greiferführungsgetriebe. Damit ergeben sich für das Trägersystem folgende Funktionen:

- ♦ starre oder elastische Kopplung zwischen dem Greifer und dem Greiferführungsgetriebe
- ♦ gegebenenfalls Auswechslungsmöglichkeiten des Greifers
- ♦ Übertragung von Informationen zwischen dem Greifer und dem Greiferführungsgetriebe [VDI95].

2.4.2.4 Informationsverarbeitungssystem

Nach [VDI95] ist es die Aufgabe des Informationsverarbeitungssystems, Informationen mit einem Sensor aufzunehmen, sie mit der Aufnehmerelektrik zu verstärken, an die nachfolgende Verarbeitungsstufe anzupassen und über eine Schnittstelle an die Steuerung zu übergeben. Zum Informationsverarbeitungssystem gehören demnach alle Elemente, die Informationen aufnehmen, anpassen, verstärken, auswerten oder weiterleiten. Die Information betrifft hier:

- ♦ den Status des Greifers
- ♦ die Parameter der Greifaufgabe
- ♦ das Greifobjekt.

2.4.2.5 Antriebssystem

Das Antriebssystem eines Greifers liefert die für das Öffnen und Schließen erforderliche Bewegungsenergie und die zum Handhaben eines Objektes benötigte Haltekraft. Die Energie für das Antriebssystem kann in Form von mechanischer, elektrischer, pneumatischer oder hydraulischer Energie zugeführt werden. Innerhalb des Antriebssystems erfolgt eine Energieumwandlung in mechanische Energie und gegebenenfalls in eine Bewegungsform (Rotation, Translation) [VDI95].

2.4.3 künstliche Hände

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

Salisbury hat gezeigt, dass Hände für Manipulationsaufgaben mindestens über drei Finger mit je drei Freiheitsgraden verfügen müssen [Sal83]. Im Bereich der künstlichen Hände sind Fingerzahlen zwischen drei und fünf anzutreffen. Die Gründe hierfür liegen in der Steuerungsart der Hand. Bei Telemanipulationsaufgaben, die durch einen Datenhandschuh gesteuert werden, ist es durchaus sinnvoll die menschliche Hand nachzuahmen. Bei Händen in technischen Anwendungen, die durch einen Zentralrechner gesteuert werden, wird meist aus Kostengründen auf einen vierten oder fünften Finger verzichtet [But99].

Prinzipiell existieren zwei grundlegende Bauarten von künstlichen Händen: die integrierte und die modulare Bauweise. Bei der modularen Bauweise sind alle für die Fingerbewegungen nötigen Aktoren in der Hand und in den Fingern untergebracht. Somit ist es möglich, die Hand an beliebige Manipulatoren oder Handhabungskinematiken anzupassen. Auch sind diese Hände aufgrund der Baugröße der Komponenten meist deutlich größer als die menschliche Hand [Lot02].

Bei der integrierten Bauweise werden die Aktoren in eine Armkinematik integriert, das heißt aus dem Gehäuse der Hand ausgelagert. Die Kraftübertragung geschieht meist mit Seilzügen, Gestängen oder pneumatisch. 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 [Lot02].

Die ersten modularen Hände waren die Stanford- und die Barret-Hand. Die Stanford-Hand wurde 1983 entwickelt und ist bereits mit taktilen Sensoren ausgerüstet, die den Tastsinn der menschlichen Hand nachempfinden sollen. Der Greifer war nur mit drei Fingern ausgestattet, konnte aber das in der Hand manipulieren. Die Barret-Hand wurde 1988 als modularer Greifer vorgestellt und wird heute über die Firma Schunk in Deutschland vertrieben. Bei diesem Handkonzept wird die Antriebsenergie mittels Schneckengetrieben und Bowdenzügen an die Fingerglieder übertragen. Insgesamt hat die Hand drei Wirkelemente oder drei Finger. Vier Servomotoren mit Wegmesssystemen stellen die Antriebsenergie bereit und steuern die insgesamt sieben Gelenke an [Wol04].

Bei der 2004 entwickelten DLR-Hand wurde gegenüber der NASA-Entwicklung auf einen Finger der Hand verzichtet. In die 4-Finger-Hand wurden, inklusive der adaptierbaren Handfläche, 13 gesteuerte Freiheitsgrade und knapp 100 Sensoren integriert. Da auch die gesamte notwendige Aktorik integriert wurde, ist die DLR-Hand größer als die menschliche [Wol04].

2.4.4 Flexible Greifsysteme

Die nach dem Stand der Technik verfügbaren industriellen Greifern sind wenig flexibel gegenüber sich ändernden Objektgeometrien, aber sie sind preiswerte, robuste Werkzeuge für eine Vielzahl von Anwendungen. Künstliche Hände zielen vorwiegend auf den Bereich der Servicerobotik ab. Sie haben einen hohen Grad an Flexibilität gegenüber sich verändernden Objektgeometrien, sind aber in der Regel zu komplex,

um im industriellen Umfeld wirtschaftlich eingesetzt werden zu können. Abbildung 8 zeigt den Zusammenhang zwischen Wirtschaftlichkeit und Flexibilität von heutigen Greifsystemen. Um den Forderungen nach Flexibilität und wirtschaftlicher Einsatzfähigkeit gerecht zu werden, müssen Ansätze gefunden werden, die einen geeigneten Kompromiss zwischen niedriger Komplexität und hoher Flexibilität darstellen [Sch04].

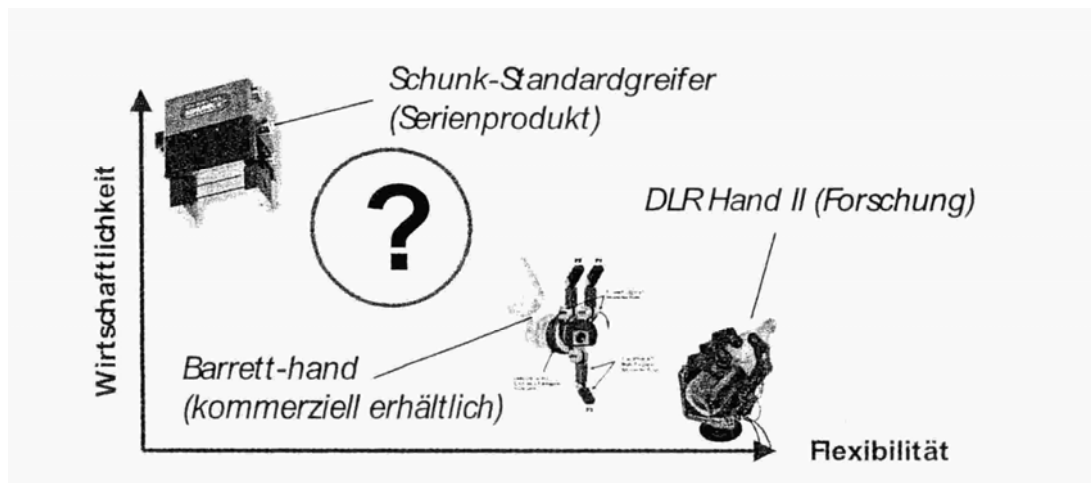


Abbildung 8: Stand der Technik und Forschung im Bereich der Greiftechnik [Sch04]

Die Analyse der menschlichen Hand zeigt beispielsweise, dass nur drei Griffe notwendig sind, um ein großes Teilespektrum im industriellen Umfeld abdecken zu können:

- ♦ Zwei-Finger-Griff
- ♦ Drei-Finger-Parallelgriff
- ♦ Drei-Finger-Zentrischgriff.

Am Fraunhofer IPA wurde ein Greiferkonzept entwickelt, welches in der Lage ist diese Griffe auszuführen, jedoch nur über zwei elektrische Antriebe verfügt: die IPA-Hand [Sch04]. Im Gegensatz zu den künstlichen Händen kann sie das Greifobjekt nicht manipulieren und versucht nicht die menschliche Hand nachzubilden. Sie soll als ein Beispiel für einen flexiblen Greifer beschrieben werden.

Die IPA-Hand verfügt über einen Daumen und zwei Finger. Der Daumen kann zwischen zwei festen Positionen verschoben werden. Er ist aber, bezogen auf die Richtung der Greifkraft, starr angeordnet. Jeder Finger ist frei programmierbar und sowohl um seine Hochachse als auch um seine Querachse drehbar gelagert. Um die Hochachse können die Finger simultan gedreht werden um die Gesamtkonfiguration zu

ändern. Eine Fingerdrehung um die Querachse ergibt die eigentliche Greifbewegung. Durch ein zweistufiges Getriebe kann sich die IPA-Hand selbstständig in drei Fingerstellungen konfigurieren [Sch04].

Mit dieser Kinematik sind somit die drei angestrebten Griffe ausführbar. In Abbildung 9 auf der nächsten Seite sind die Griffmöglichkeiten der IPA-Hand in unterschiedlichen Perspektiven dargestellt. Links ist der Drei-Finger-Parallelgriff zu sehen. Die beiden Finger stehen hierbei parallel zueinander und der Daumen steht in der Mitte der Finger. Mit diesem Griff können lange, zylindrische oder kubische Objekte gegriffen werden. In der Mitte ist der Zwei-Finger-Griff dargestellt. In dieser Konfiguration opponiert der Daumen den unteren Finger. Sie wird zum Greifen flacher, kleiner Objekte angewendet. Rechts ist der Drei-Finger-Zentrischgriff abgebildet, der zum Aufnehmen runder Objekte dient [Sch04].

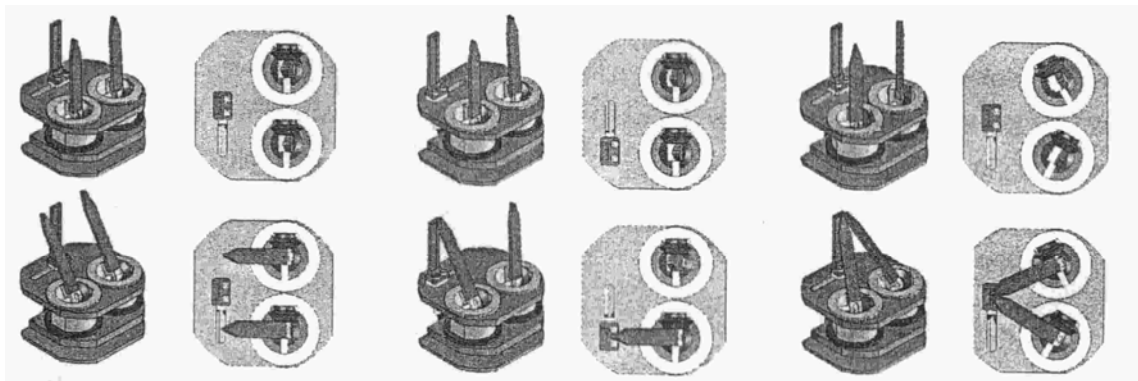


Abbildung 9: Griffmöglichkeiten der IPA-Hand [Sch04]

2.5 Sauggreifer

Die Kernelemente eines Sauggreifers sind der Vakuumerzeuger und die Saugnäpfe. Der Vakuumerzeuger stellt die Haltekraft zur Verfügung und die Saugnäpfe bringen die Haltekraft auf das Werkstück auf.

2.5.1 Vakuumerzeuger

Für die Erzeugung des Unterdrucks stehen folgende Möglichkeiten zur Auswahl:

- ♦ Pumpe
- ♦ Ejektor

- ♦ Gebläse.

Entscheidend ist hier, wie hoch das erreichbare Vakuumniveau ist und welcher Wirkungsgrad sich einstellt. Zudem ist der Volumenstrom von Bedeutung. Er hat entscheidenden Einfluss auf die Evakuierungszeit von Schläuchen und Saugnapf und stellt die Obergrenze eines eventuellen Leckvolumenstroms dar.

Gebläse zählen zu den mechanischen Pumpen, arbeiten mit wenigen zu bewegenden Teilen und sind demzufolge im Aufbau robust. Sie haben einen großen Saugvolumenstrom und werden daher im Allgemeinen für Ventilation, Kühlung, Staubsauger usw. eingesetzt. Demgegenüber stehen jedoch hohe Start- und Stoppzeiten, die die Evakuierungszeit für Saugnäpfe und Zuleitungen stark erhöhen. Zusätzlich ist der maximal erreichbare Unterdruck mit ungefähr 40 kPa relativ gering. In Verbindung mit Saugnäpfen eignen sich Gebläse daher am besten zur Handhabung von Werkstücken, auf denen sich große Saugnäpfe anbringen lassen und bei denen mit einem großen Leckvolumenstrom zu rechnen ist [Bec93].

Verdrängerpumpen zählen wie die Gebläse zu den mechanischen Pumpen und lassen sich nach ihren Funktionsprinzipien, die hier nicht näher erläutert werden sollen, weiter unterteilen. In der Industrie üblich sind beispielsweise Kolbenpumpen, Membranpumpen, Flügelzellenpumpen oder Rootspumpen. Sie unterscheiden sich in Bezug auf Anschaffungskosten, Abmessungen, Saugvolumenstrom, erzeugbarem Unterdruck, Wartungsaufwand etc. teilweise sehr stark von einander [Bec93]. Ejektoren zählen zu den Strahlpumpen und arbeiten nach dem Venturiprinzip, weshalb sie auch als Venturidüsen bezeichnet werden. Nach Becker [Bec93] wird zu ihrem Betrieb Druckluft verwendet, deren kinetische Energie zur Erzeugung des Vakuums eingesetzt wird. Abbildung 10 auf der nächsten Seite zeigt das Funktionsprinzip eines Ejektors.

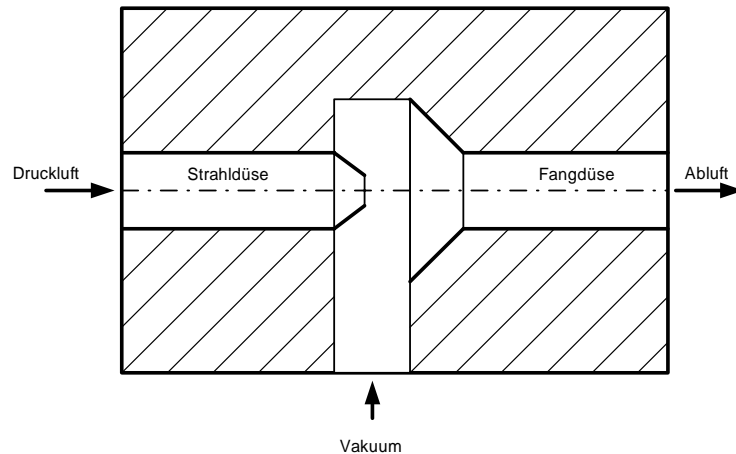


Abbildung 10: Funktionsweise eines Ejektors [Bec93]

In die Strahldüse des Ejektors wird die Druckluft mit einer bestimmten Grundgeschwindigkeit eingespeist. Die Querschnittsverengung der Strahldüse bewirkt eine Erhöhung der Luftströmungsgeschwindigkeit bis auf Überschallgeschwindigkeit. Nach dem Austritt der Luft aus der Strahldüse expandiert die Luft und strömt durch die Fangdüse aus. Dabei entsteht in der Expansionskammer ein Vakuum, das die Luft durch den Sauganschluss absaugt. Die abgesaugte Luft und die Druckluft treten gemeinsam als Abluft aus dem Ejektor aus. Die Höhe des Vakuums ist abhängig vom anliegenden Versorgungsdruck der Druckluft. Die meisten Vakuumkomponentenhersteller vertreiben Ejektoren, die bei einem Versorgungsdruck von vier bis fünf bar das maximale Vakuumniveau von 90 kPa liefern. Ob ein Ejektor den nötigen Volumenstrom liefert, muss jedoch noch geprüft werden [Bec93].

Da Ejektoren über keine drehenden Teile verfügen, sind sie wartungs- und verschleißfrei. Die Wärmeentwicklung ist sehr gering. Ejektoren weisen eine kompakte Bauweise und ein geringes Eigengewicht auf. Ihr Einbau ist lageunabhängig, einfach zu realisieren und erfolgt im Allgemeinen direkt am Anwendungsort. Die Schaltzeit eines Ejektors ist sehr kurz, und der Aufbau des Vakuums im Saugelementwirkraum erfolgt schnell. Beim Betrieb von Ejektoren sollte der Einsatz von Schalldämpfern in Betracht gezogen werden, da ansonsten mit einer erhöhten Geräuschentwicklung zu rechnen ist [Bec93].

2.5.2 Saugnäpfe

Die Saugkraft, mit der ein Saugnapf ein Werkstück hält, resultiert aus der Druckdifferenz, die zwischen dem Vakuum im Inneren des Saugnapfs und dem atmosphärischen Druck der Umgebung herrscht. Der Saugnapf saugt sich jedoch nicht

an dem Objekt fest, sondern das Objekt und der Saugnapf werden durch den Überdruck der Umgebung gegeneinander gepresst. Die theoretisch erreichbare Saugkraft F_S ist proportional zur Druckdifferenz Δp und zur wirksamen Fläche A_W des Saugnapfs [Bec93]. Die Druckdifferenz ist normalerweise das Vakuumniveau:

$$F_S = \Delta p * A_W .$$

Im Falle einer Berechnung mit Absolutdrücken ist die Formel wie folgt zu ändern:

$$F_S = (p_{At} - p_W) * A_W .$$

Dabei ist p_{At} der absolute atmosphärische Umgebungsdruck und p_W der Absolutdruck im Wirkraum des Saugnapfs.

Für einen runden Saugnapf kann die Saugkraft auch in Abhängigkeit des wirksamen Saugnapfdurchmessers D_W berechnet werden:

$$F_S = \Delta p * D_W^2 * \frac{\Pi}{4} \text{ bzw. } F_S = (p_{At} - p_W) * D_W^2 * \frac{\Pi}{4} .$$

Der wirksame Saugnapfdurchmesser D_W und damit die vorhandene Wirkfläche eines Saugnapfs sind abhängig vom Nenndurchmesser, von der Form, dem Material und dem Belastungszustand des Saugnapfs. Bei weicheren Saugermaterialien wie Kautschuk oder Silikon verringert sich der wirksame Durchmesser, da der Saugnapf durch das Vakuum zusammengedrückt wird und sich stark an die Oberfläche des Werkstücks anschmiegt. Dadurch ergibt sich eine verhältnismäßig große Dichtfläche, die Leckvolumenströme gut unterbindet. Die wirksame Saugkraft wird jedoch kleiner (siehe Abbildung 11 auf der nächsten Seite). Dieser Effekt verstärkt sich zusätzlich bei Saugnapfen mit langen und weichen Dichtlippen wie z.B. Tiefensaugnapfen [Bec93].

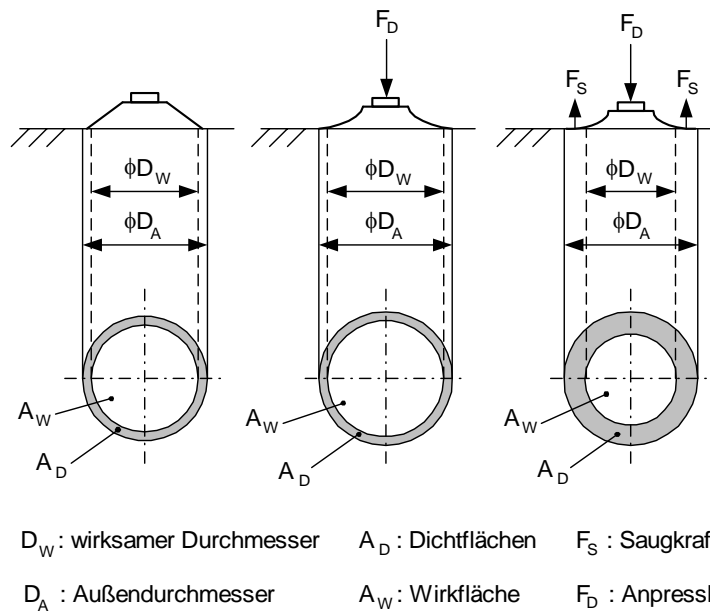


Abbildung 11: Durchmesserverhältnisse beim Andrücken des Saugnapfs [Bec93]

Die wirksame Fläche ändert sich auch bei Zugbelastung, die während der Handhabung eines Objektes auftritt. Der Saugnapf wird gedehnt und vergrößert so zunächst die Fläche, weil ein Teil der Dichtfläche wieder angehoben wird. Mit steigender Belastung zieht sich die noch vorhandene Dichtfläche in Abhängigkeit von der Materialverformbarkeit radial zusammen, und die Wirkfläche wird verkleinert (siehe Abbildung 12). Die Flächenreduktion ist dabei umso stärker, je flexibler die Dichtlippen sind [Bec93].

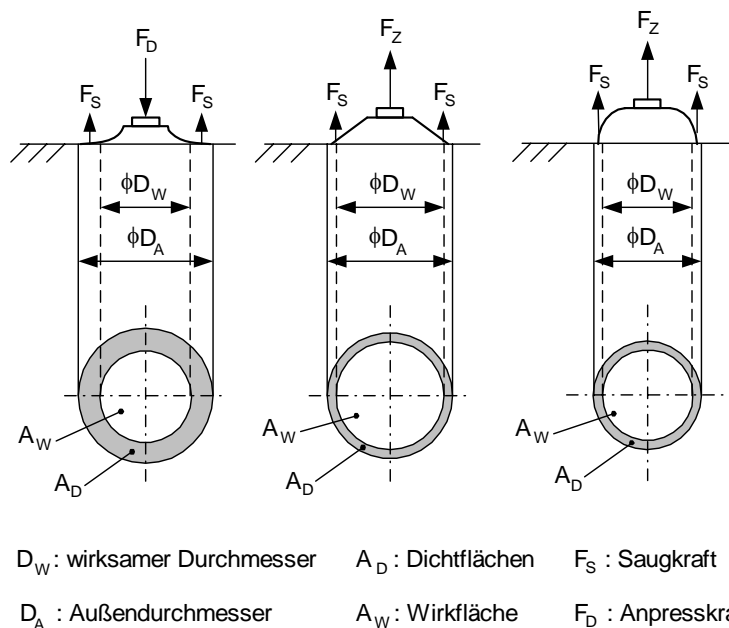


Abbildung 12: Durchmesserverhältnisse bei Zugbelastung des Saugnapfs [Bec93]

Bei härteren Saugermaterialien (Polyurethan, Chloropren, Neopren) verringert sich die wirksame Fläche nicht in diesem Maße. Allerdings kommt es bei rauen Oberflächen zu stärkeren Leckvolumenströmen, die das Vakuum im Inneren schwächen und damit ebenfalls zu einer reduzierten Saugkraft führen. Sauger aus härteren Materialien sind nicht so flexibel und können sich Kanten, Vorsprüngen und Reliefschriften nicht so gut anpassen, wie es bei weicheren Materialien der Fall ist. Im Allgemeinen sind härtere Materialien dafür widerstandsfähiger gegen Verschleiß [Bec93].

Beim Handhaben mit Saugnäpfen ist zu beachten, dass eventuell Kräfte auftreten können, die tangential zur Oberfläche wirken. Diesen Kräften wirkt nur die Reibkraft zwischen Saugnapf und Objekt Oberfläche bis zur Haftreibungsgrenze entgegen. Dies muss bei der Berechnung der Saugkraft einbezogen werden, da sich sonst Saugnapf und Objekt zueinander verschieben und ein genaues Handhaben nicht mehr möglich ist.

3 ANALYSE DER RANDBEDINGUNGEN FÜR DIE ZU ENTWICKELNDEN WERKZEUGE UND ABLEITUNG VON ANFORDERUNGEN FÜR DIE KONSTRUKTION

3.1 Analyse handelsüblicher Akkuboehrschrauber hinsichtlich ihrer Eignung zur automatisierten Fertigung

3.1.1 Vorgehensweise

Bei der Analyse der Akkuboehrschrauber wird geprüft, ob und mit welchem Aufwand es möglich ist diese in einer Vorrichtung aufzunehmen, die von einem Industrieroboter geführt werden kann. Dazu werden die einzelnen Teilsysteme, die zum Bedienen und Handhaben eines Akkuboehrschraubers nötig sind, definiert und grundlegende Anforderungen für die Teilsysteme und das Gesamtsystem aufgestellt.

Daraufhin werden die einzelnen Anforderungen näher erläutert und nach Möglichkeit quantifiziert. Hierfür werden die Geometrie, Abmessungen und andere Eigenschaften von Akkuboehrschraubern unterschiedlicher Hersteller ermittelt und die Akkuboehrschrauber unter anderem in einer 3-D-CAD-Umgebung nachmodelliert. Schließlich wird eine Anforderungsliste ausgearbeitet, die als Grundlage für die Konzeption und Entwicklung der Vorrichtung dienen.

3.1.2 Aufnahme des Werkzeuges in einer robotergeführten Vorrichtung

Um einem Industrieroboter das Bohren zu ermöglichen, muss eine Schnittstelle zwischen Roboter und Akkuboehrschrauber geschaffen werden. Diese Schnittstelle ist eine plug-and-play-fähige Vorrichtung, die vom Roboter geführt und in die der Bohrschrauber fest eingespannt wird. Plug-and-play-fähig bedeutet, dass die

Vorrichtung direkt zum Bohren eingesetzt werden kann, ohne dass vorher ein Einrichtprozess nötig ist oder ein zu verwendender Akkuboehrschrauber speziell für die Aufnahme in der Vorrichtung vorbereitet werden muss.

Die Vorrichtung soll flexibel sein, sowohl in Bezug auf den Robotertyp als auch auf den Typ des Akkuboehrschraubers. Das Ein- und Ausspannen soll manuell, ohne großen Aufwand und in kürzester Zeit möglich sein. Gleichzeitig muss die gesamte Vorrichtung robust gegenüber den Prozesskräften und unempfindlich gegenüber den, beim Bohren auftretenden, Spänen sein. Die Vorrichtung muss in der Lage sein den Bohrprozess zu überwachen und zu kontrollieren und dafür mit dem Zellenrechner kommunizieren können.

3.1.3 Definition von Teilsystemen

Das Gesamtsystem der Aufnahmevorrichtung wird in Teilsysteme aufgespalten. Dadurch ist es einfacher die Anforderungen an die Aufnahmevorrichtung herauszustellen und zu kategorisieren und geeignete Lösungen für die Teilsysteme zu erarbeiten. Die Aufnahmevorrichtung besteht aus folgenden Teilsystemen:

- ♦ Trägersystem
- ♦ Spannsystem
- ♦ Betätigungssystem
- ♦ Werkzeugsteuerung und Sensorik.

In Abbildung 13 auf der nächsten Seite sind schematisch die Kraft-, Energie- und Informationsflüsse innerhalb der Aufnahmevorrichtung und zwischen Aufnahmevorrichtung, Industrieroboter, Zellenrechner, Werkzeugwechselsystem und Akkuboehrschrauber dargestellt.

3.1.5 Spannsystem

Die Aufgabe des Spannsystems besteht darin, den Akkubohrschrauber in der Vorrichtung zu fixieren, indem es die Kräfte und Momente, die auf den Akkubohrschrauber einwirken, aufnimmt und an das Trägersystem weiterleitet. Da beim Bohren gradlinig in Richtung der Motorachse des Bohrschraubers vorgeschoben wird, sind in dieser Richtung auch die höchsten Kräfte zu erwarten. Das Fixieren wird daher in die folgenden Unterfunktionen aufgeteilt:

- ♦ Erzeugen der axialen Spannkraft
- ♦ Aufbringen der axialen Spannkraft, sodass der Akkubohrschrauber auch radial gespannt und damit gleichzeitig ein Kippen der Motorachse verhindert wird
- ♦ Akkubohrschrauber um die Motorachse orientieren und gegen Verdrehen sichern

Die Spannkraft kann entweder nur passiv, durch den Vorgang des Einspannens selbst erzeugt werden oder passiv und aktiv, wobei der aktive Kraftanteil durch einen Antrieb erzeugt wird. Der passive Kraftanteil bei der zweiten Variante soll den Bohrschrauber nur in der Vorrichtung sichern während die Antriebe ausgeschaltet sind, der aktive Kraftanteil soll die Prozesskräfte beim Bohren aufnehmen. Ein rein aktives Spannen ist nicht möglich, da beim Abschalten der Antriebe oder beim Ausfall der Antriebsenergie der Bohrschrauber nicht mehr gesichert ist.

Das Erzeugen der Spannkraft kann im Prinzip unabhängig vom zu spannenden Bohrschraubermodell betrachtet werden. Die Höhe der Spannkraft orientiert sich an der Kraft, mit der ein Mensch ungefähr einen Akkubohrschrauber handhaben kann. Es wird angenommen, dass diese im Allgemeinen einen Wert von 200 N bei der Nutzung einer Hand nicht überschreitet. Mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 ergibt sich daraus eine Spannkraft von mindestens 300 N, was einer Gewichtskraft von ca. 30 kg entspricht.

Um die Spannkraft auf den Akkubohrschrauber übertragen zu können, muss zunächst ermittelt werden, an welchen Stellen am Akkubohrschrauber dies möglich bzw. sinnvoll ist, damit der Bohrschrauber auch radial fixiert wird. Da die Vorrichtung jedoch nicht nur ein bestimmtes Modell aufnehmen können muss, ist es notwendig, Gemeinsamkeiten bei den Stellen zu finden, an denen die Spannkraft auf den jeweiligen Bohrschrauber übertragen werden soll.

Dazu werden sechs hochwertige Akkuboehrschraubermodelle verschiedener Hersteller in einem 3-D-CAD-System nachmodelliert. Die Bohrschraubermodelle sind:

- ♦ AEG Raptor BBS 12KX
- ♦ Bosch GSR 12V Professional
- ♦ Fein ABS 12 Handymaster
- ♦ Festool TDD 12 FX
- ♦ Makita 6096 DWE
- ♦ und Würth Master BS 12

Um einigermaßen detailgetreue CAD-Modelle zu erhalten, werden die Akkuboehrschrauber, wie in Abbildung 14 zu sehen ist, auf ein Blatt Papier gelegt, das ein Raster mit einem Linienabstand von 10 mm besitzt, und mit einer Digitalkamera fotografiert.



Abbildung 14: Akkuboehrschrauber mit Raster

Auf diese Weise lässt sich die äußere Kontur bis auf ca. 3-5 mm genau bestimmen und im CAD nachbilden. Die sechs ausgewählten Geräte stellen nur einen repräsentativen Teil des Modellspektrums dar. Andere Bohrschrauber, die in einem gewissen Toleranzbereich von den hier Ausgewählten abweichen, sollen auch in der Vorrichtung

aufgenommen werden können. Daher ist eine höhere Genauigkeit bei der Übertragung in die CAD-Umgebung nicht notwendig. Abbildung 15 zeigt einen Vergleich der sechs nachgebildeten Modelle.



Abbildung 15: CAD-Modelle der Akkuboehrschrauber

Grundsätzlich ist das Aufbringen der Spannkraft an allen nicht beweglichen Teilen eines Akkuboehrschraubers möglich. Eine Ausnahme bildet der drehbare Ring am vorderen Teil des Gehäuses, mit dem die Drehzahl eingestellt werden kann. Das Bohrfutter und die Bereiche um den Betätigungsknopf und den Schieber für die Umkehr der Drehrichtung eignen sich nicht für das Aufbringen der Spannkraft.

Es bleiben damit am Handgriff der vordere Bereich vom Betätigungsknopf an abwärts und der gesamte hintere Bereich. Am Motorgehäuse stehen ebenfalls der gesamte hintere Teil und im vorderen Teil ein Ring zwischen Bohrfutter und Betätigungsknopf zum Aufbringen der Spannkraft zur Verfügung.

In Abbildung 16 sind die Bohrschrauber als Kantenmodelle in der Seitenansicht hintereinander angeordnet. Sie sind so ausgerichtet, dass die Motorachsen parallel und auf gleicher Höhe sind und sich der Übergang zwischen Gehäuse und Bohrfutter bei allen an derselben Stelle befindet. Diese Stelle ist durch den roten Strich gekennzeichnet.

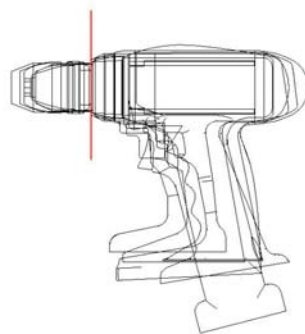


Abbildung 16: Akkuboehrschrauber im Vergleich

Es ist zu erkennen, dass die Formen und Abmessungen der Motorengehäuse wesentlich mehr Ähnlichkeiten untereinander aufweisen, als die der Handgriffe. Diese unterscheiden sich in Bezug auf Länge und Breite, den Winkel, den sie mit der Motorachse bilden, und die äußere Kontur stärker voneinander. Die Motorengehäuse unterscheiden sich zum einen in der Länge, im Durchmesser und in der Kontur. Das Motorgehäuse ist zylinderförmig, lediglich das Modell von Fein bildet mit seiner bauchigen Form eine Ausnahme. Die Vorderseite mit dem drehbaren Ring verjüngt sich vom Durchmesser des Motorgehäuses auf den Durchmesser des Bohrfutters. An der Rückseite ist bei einigen Modellen eine halbkugelförmige Kuppe zu finden, andere Modelle sind entweder grade oder schräg abgeflacht. Die abgeschrägte Fläche bildet dabei stets mit der Unterseite des Motorgehäuses einen spitzen Winkel. Aus Tabelle 1 sind die Daten der Motorgehäuse zu entnehmen.

Tabelle 1: Motorgehäusedaten

Bohrschraubermodell	Länge des Motor- gehäuses [mm]	Durchmesser des Motorgehäuses [mm]	Durchmesser des Bohrfutters [mm]
AEG	165	75	46
Bosch GSR 12V professional	179	73	43
Fein ABS 12	175	64-84	45
Festool TDD 12 FX	187	69	47
Makita	164	62	44
Würth Master BS 12	197	76	43

Das Aufbringen der Axialkraft auf die verschiedenen Bohrschraubermodelle mit einem Spannsystem ist daher leichter, wenn dies jeweils an der Rückseite und im vorderen Ringbereich des Motorengehäuses geschieht. Das Aufbringen der Axialkraft auf den Umfang des Motorgehäuses ist ungünstig, da die Konturen hier zu stark voneinander abweichen.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Motorachsen der Akkubohrschrauber automatisch gleich positioniert und orientiert sind und diese nicht von dem verwendeten Bohrschraubermodell abhängen. So lässt es sich sehr einfach realisieren, dass die sechste Achse des Industrieroboters immer in einer Linie mit der Motorachse liegt. Auf diese Weise wird später der Aufwand beim Programmieren der Roboterbahn verringert, da der TCP (die Bohrspitze) in der Verlängerung des Mittelpunktes des Handflansches liegt. Der Abstand beider Punkte auf der Achse ist lediglich vom Bohrfutter und der Länge des Bohrers abhängig.

Beim Einspannen in die Aufnahmevorrichtung muss die Orientierung des Bohrschraubers um die Motorachse vorgegeben und während der gesamten Zeit, in

der der Bohrschrauber eingespannt bleibt, aufrecht erhalten werden. Dies ist notwendig, um den Betätigungsknopf an einer definierten Stelle zu fixieren und so dem Betätigungssystem einen festen Angriffspunkt vorzugeben.

Hierfür eignen sich am besten die Seitenflächen des Handgriffs. Wird eine der beiden Seitenflächen gegen eine Begrenzungsfläche positioniert, so ist die Orientierung des Bohrschraubers um die Motorachse vorgegeben. Ein Verdrehen kann nur durch ein Moment um die Motorachse verursacht werden. Dieses Moment bewirkt, mit dem Handgriff als Hebelarm, eine Kraft auf eine der beiden Seitenflächen. Diese Kraft kann von der Begrenzungsfläche aufgenommen und an das Trägersystem weitergeleitet werden. Um beiden Drehrichtungen gerecht zu werden, muss der Griff zwischen zwei Begrenzungsflächen fixiert werden.

3.1.6 Betätigungssystem

Die Aufgabe des Betätigungssystems besteht darin, die Drehzahl des Akkubohrschraubers einzustellen und während des Bohrprozesses möglichst konstant zu halten. Üblicherweise geschieht dies durch Drücken des Betätigungsknopfes, wofür das Betätigungssystem mit einem Aktor ausgerüstet werden muss. Die Drehzahl soll innerhalb einer Sekunde erreicht werden, wobei die Abweichung der Ist-Drehzahl von der Soll-Drehzahl bis zu 10% betragen darf.

Prinzipiell besteht noch die Möglichkeit der direkten Steuerung des Motorstroms durch die Werkzeugsteuerung. Hierfür ist jedoch ein Eingriff in die Elektronik unumgänglich, was wiederum bedeutet, dass jeder Bohrschrauber, der eingesetzt wird, speziell vorbereitet werden muss. Dies widerspricht allerdings der Forderung nach plug-and-play-Fähigkeit, weswegen diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt wird.

Bei allen Akkubohrschraubern befindet sich der Betätigungsknopf an der Vorderseite des Handgriffs im Bereich des Übergangs zum Motorgehäuse. Die Abstände des Betätigungsknopfes vom Bohrfutter und von der Motorachse sind von Modell zu Modell unterschiedlich. Der Aktor zum Drücken des Knopfes muss daher in zwei Richtungen verstellbar sein.

Der Betätigungsknopf ist bei allen Bohrschraubermodellen vorgespannt und beginnt sich erst ab einer bestimmten Mindestkraft zu bewegen, wodurch das Bohrfutter anfängt, sich zu drehen. Durch Erhöhung der Kraft wird der Knopf weiter eingedrückt

und das Bohrfutter dreht sich schneller, bis ab einer Maximalkraft der Knopf komplett eingedrückt und die Maximaldrehzahl erreicht ist. Die Mindest- und Maximalkräfte für die verschiedenen Modelle werden mit einem Kraftmesser und der Weg, um den ein Betätigungsknopf eingedrückt wird, mit einem Messschieber gemessen. Die Werte sind Tabelle 2 zu entnehmen, BF steht für den Abstand des Betätigungsknopfes vom Bohrfutter, MA für den Abstand von der Mittelachse.

Tabelle 2: Daten der Betätigungsknöpfe

Bohrschraubermodell	Kraftbereich des Betätigungs-knopfes [N]	Weg des Betätigungs-knopfes [mm]	Position des Betätigungs-knopfes [mm]
AEG	8-19	9	BF:70, MA:63
Bosch GSR 12V professional	11-20	7	BF:55, MA:53
Fein ABS 12	8-18	9	BF:80, MA:55
Festool TDD 12 FX	10-21	8	BF:44, MA:56
Makita	10-19	9	BF:47, MA:59
Würth Master BS 12	9-19	8	BF:60, MA:50

Der Zusammenhang zwischen Betätigungsweg und Drehzahl wird nicht ermittelt, da hierfür zeitaufwendige Messreihen für jedes Bohrschraubermodell nötig wären und die Drehzahl während des Bohrens zusätzlich vom gewählten Bohrer und der Holzart abhängen.

3.1.7 Werkzeugsteuerung und Sensorik

Die Aufgabe der Werkzeugsteuerung besteht darin, mit dem Zellenrechner zu kommunizieren, um den Bohrprozess zu koordinieren, und die werkzeugeitigen Prozessparameter zu überwachen und zu kontrollieren. Die für den Bohrprozess relevanten Parameter sind:

- ♦ Vorschub
- ♦ Drehzahl
- ♦ resultierende Kräfte und Momente

Für den Vorschub ist der Roboter zuständig, weswegen die Werkzeugsteuerung hierauf keinen direkten Einfluss hat. Erreicht einer der anderen Parameter,

beispielsweise die resultierende Kraft, einen unzulässigen Wert, so wird dies von der Werkzeugsteuerung an den Zellenrechner übermittelt, die dann den Vorschub ändert.

Die Drehzahl kann prinzipiell entweder durch Messen des Motorstroms oder direkt am Bohrfutter festgestellt werden. Die erste Möglichkeit scheidet aus, da auch hier wieder ein Eingriff in die Elektronik nötig wäre. Am Bohrfutter kann die Drehzahl entweder durch:

- ♦ Zählen von Drehinkrementen und Ableiten nach der Zeit
- ♦ oder durch Messen der Umfangsgeschwindigkeit des Bohrfutters bestimmt werden.

Bei der ersten Methode kostet das Ableiten Rechenzeit, wodurch eventuell die Regelung der Drehzahl verlangsamt wird. Die zweite Methode bringt eine gewisse Ungenauigkeit mit sich, da die Umfangsgeschwindigkeit noch durch den Bohrfutterdurchmesser geteilt werden muss, um die Drehzahl zu erhalten. Wie aus Tabelle 1 auf Seite 34 zu entnehmen ist, weichen die Durchmesser jedoch nur geringfügig voneinander ab, weshalb der Fehler hier durchaus tolerierbar ist.

Die aus dem Bohrprozess auf den Bohrschrauber und die Aufnahmevorrichtung zurückwirkenden Kräfte und Momente werden gemessen, um bei einer Fehlfunktion die Beschädigung des Werkzeugs, der Vorrichtung oder der Roboterzelle zu verhindern. Das Messen kann entweder zwischen Spannsystem und Trägersystem oder zwischen Aufnahmevorrichtung und Roboterflansch geschehen.

3.1.8 Anforderungsliste

In der Anforderungsliste werden die Ziele und Bedingungen in Form von Forderungen und Wünschen mit quantitativen und qualitativen Angaben aufgeführt. Forderungen sind dabei Bedingungen, die unter allen Umständen erfüllt werden müssen. Wünsche enthalten Bedingungen, die nach Möglichkeit berücksichtigt werden sollten und unter Umständen einen gewissen Mehraufwand erfordern dürfen.

Die Anforderungsliste für die Aufnahmevorrichtung ist in Tabelle 3 auf der nächsten Seite zu sehen. Forderungen sind mit (F) und Wünsche mit (W) gekennzeichnet.

Tabelle 3: Anforderungsliste der Aufnahmevorrichtung

Nr.	Anforderung	F/W
	<i>Gesamtsystem</i>	
1	plug-and-play-Fähigkeit	F
2	geringes Gewicht	W
3	Bohren nah an einer Ecke/Kante ermöglichen	F
4	kompatibel zu allen Schraubertypen ohne Umrüsten	W
5	einfaches Umrüsten, falls Schraubertyp nicht kompatibel	F
6	Energieform: Gleichstrom bis 24 V und/oder Druckluft bis 8 bar	F
	<i>Trägersystem</i>	
7	hohe Steifigkeit	F
8	Kompatibel zum Werkzeugwechselsystem	F
	<i>Spannsystem</i>	
9	Erzeugung der axialen Spannkraft (> 300 N)	F
10	Aufbringen der Spannkraft auf den Bohrschrauber	F
11	Sicherung des Bohrschraubers gegen Verdrehen	F
12	schnelles Einsetzen des Bohrschraubers ermöglichen	W
13	einfache Bedienbarkeit	W
	<i>Betätigungssystem</i>	
14	Einstellbarkeit der Drehzahl mit einer Abweichung von $\pm 10\%$	F
15	erreichen der Söldrehzahl innerhalb 1 Sekunde	W
16	schnelle Anpassung auf verschiedene Schraubertypen ohne Umrüsten	W
	<i>Werkzeugsteuerung und Sensorik</i>	
17	Kommunikation mit dem Zellenrechner	F
18	Messen der Drehzahl	F
19	Messen der Kräfte und Momente beim Bohren	W
20	schnelle Steuerung bzw. Regelung der Drehzahl	F

3.2 Analyse der Greifaufgabe des flexiblen Greifsystems

3.2.1 Vorgehensweise

Bei der Analyse der Greifaufgabe werden zunächst die Teilsysteme des flexiblen Greifers definiert. Daraufhin werden die Randbedingungen und Vorgaben zu Greifaufgabe und Greifer vorgestellt und untersucht. Diese sind:

- ♦ die zu handhabenden Greifobjekte
- ♦ Vorgaben zur Greiferbauart
- ♦ Randbedingungen der Greifaufgabe.

Anschließend werden hieraus die Anforderungen für die einzelnen Teilsysteme und den Greifer als Gesamtsystem abgeleitet und nach Möglichkeit quantifiziert. Zuletzt wird, wie bei der Aufnahmevorrichtung, eine Anforderungsliste ausgearbeitet, die als Grundlage für die Konzeption und Entwicklung des Greifsystems dienen.

3.2.2 Definition der Teilsysteme

Die Teilsysteme des Greifers werden entsprechend der VDI-Richtlinie 2740 definiert. Sie sind bereits in Kapitel 2.4.2 beschrieben und sollen hier lediglich noch einmal aufgezählt werden:

- ♦ Wirksystem
- ♦ kinematisches System
- ♦ Trägersystem
- ♦ Informationsverarbeitungssystem
- ♦ Antriebssystem.

Eine Änderung bezüglich der Definition des Informationsverarbeitungssystems wird jedoch vorgenommen. Da auch für den flexiblen Greifer die Forderung nach plug-and-play-Fähigkeit gilt und eine Steuerung in den Greifer eingebaut wird, wird diese, im

Gegensatz zur VDI-Richtlinie 2740, als Teil des Informationsverarbeitungssystems angesehen.

Wie die Aufnahmevorrichtung ist auch der flexible Greifer über ein Werkzeugwechselsystem mit dem Industrieroboter verbunden. Abbildung 17 verdeutlicht durch Darstellung der Kraft-, Energie- und Informationsflüsse zwischen den Teilsystemen deren Zusammenhang.

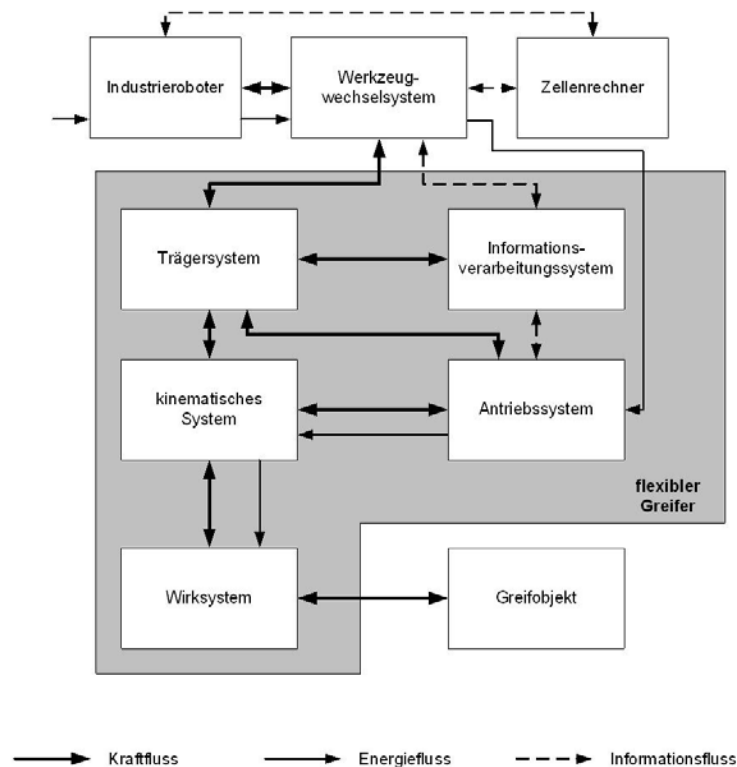


Abbildung 17: Kraft-, Energie- und Informationsflüsse des Greifers

3.2.3 Greifobjekte

Der Greifer soll allgemein in der Lage sein, kleine und mittlere Objekte variabler Geometrie handhaben zu können und im Speziellen unter anderem dazu benutzt werden, einen Holzdübel in ein Bohrloch zu fügen. Das Spektrum der verschiedenen Objektformen wird durch drei Referenzgeometrien bzw. -körper repräsentiert, da nicht alle Unterschiede im Einzelnen berücksichtigt werden können. Die Referenzgeometrien sind:

- ♦ Kugel

- ♦ Zylinder
- ♦ und Quader.

Die Auswahl dieser recht einfachen Körper steht dabei jedoch nicht im Widerspruch zur Forderung nach Flexibilität oder soll die Konstruktion vereinfachen. Nach Kreis [Kre03] sind kompliziert aufgebaute Teile häufig einfach zu handhaben und erleichtern damit den Automatisierungsprozess, wogegen einfach aufgebaute Teile unter Umständen schlecht handhabbar sind.

Für jeden Körper gibt es verschiedene Abmessungen, die der Greifer handhaben können muss bzw. soll. Dabei sind die Abmessungen so gewählt, dass große und kleine, flache, gedrungene und längliche Körper entstehen. Es gibt dabei sowohl gewünschte und geforderte Mindestmaße als auch gewünschte und geforderte Höchstmaße. Die Abmessungen der sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Abmessungen der Greifobjekte

Abmessung [mm]	gefordert	gewünscht
min. Kugeldurchmesser	10	5
max. Kugeldurchmesser	70	100
min. Ausdehnung eines Kleinteils	5	0
max. Breite eines Körpers beim Parallelgriff	50	75

Die Masse der Objekte, die der Greifer handhaben können muss, beträgt mindestens 1 kg, gewünscht ist jedoch eine Masse von 1,5 kg.

3.2.4 Vorgaben zur Greiferbauart

Bezüglich der Bauart des Greifers sind durch die Aufgabenstellung drei Restriktionen vorgegeben, die Auswirkungen auf das Greifen haben und bei der Ableitung von Anforderungen beachtet werden müssen. Der Greifer:

- ♦ ist als Fingergreifer zu konstruieren
- ♦ ist auf starre Finger auszulegen, es soll aber eine Anbaumöglichkeit für flexible Finger vorgesehen werden
- ♦ wird durch herkömmliche Pneumatik angetrieben.

Am Fraunhofer IPA ist ein flexibler Finger entwickelt worden, der auf dem Finray-Effekt beruht und mit dem der Greifer zu Versuchszwecken ausgerüstet werden soll. Der Finger besteht aus mehreren Gliedern, die jedoch selbst nicht angetrieben, sondern mit federnden Elementen versehen sind und sich dadurch automatisch an die Außenfläche eines Greifobjektes anschmiegen, wenn sie gegen dieses gedrückt werden. In Abbildung 18 sind CAD-Modelle eines Finray-Fingers mit drei Gliedern zu sehen.



Abbildung 18: CAD-Modelle eines Finray-Fingers

Das Greifprinzip, das angewendet wird, ist abhängig davon, mit welcher Fingerart der Greifer ausgerüstet ist. Sind es starre Finger, wird das Greifobjekt lediglich durch Reibschluss gehalten (Abbildung 19 links). Bei den flexiblen Fingern kommt eine Mischung aus Kraftschluss und Formschluss zum Tragen (Abbildung 19 rechts).

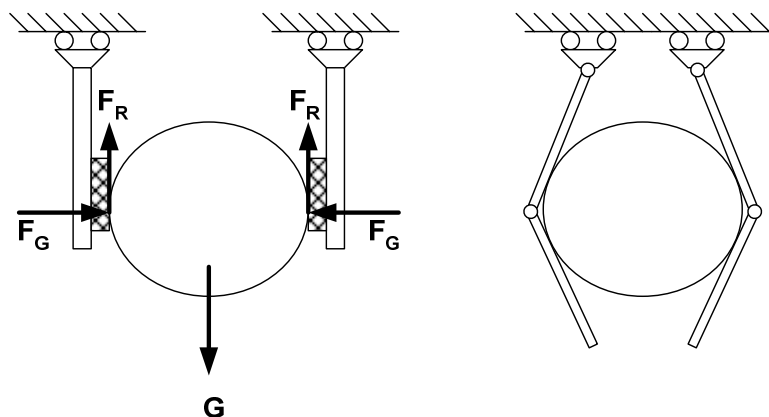


Abbildung 19: Greifprinzipien bei starren (links) und flexiblen Fingern (rechts)

Holzdübeln sollen lediglich mit starren Fingern gefügt werden. Die Kraft hierfür ist jedoch nur über Reinschluss nicht aufzubringen, weshalb auf diesen Sonderfall in Kapitel 5.4 noch einmal näher eingegangen wird.

Mit herkömmlicher Pneumatik ist gemeint, dass der Greifer nicht servo-pneumatischen Antrieben ausgerüstet werden soll. Die Finger können daher nur gegen Anschläge positioniert werden, wobei das Greifobjekt selber auch als Anschlag dient.

3.2.5 Randbedingungen beim Greifen

Folgende Randbedingungen sind durch die Aufgabenstellung vorgegeben:

- ♦ Greifer und Greifobjekt werden stark beschleunigt
- ♦ die Greifkraft wird mit zweifacher Sicherheit ausgelegt
- ♦ Greifen soll auch möglich sein werden, wenn das Objekt nahe an einer Innenecke oder –kante liegt
- ♦ Zwischen- und Innengriff sollen möglich sein
- ♦ Greifobjekte brauchen nicht intern manipuliert werden
- ♦ hohe Kräfte beim Fügen eines Dübels.

Da der Greifer von einem Industrieroboter geführt wird, können während des Handhabens relativ hohe Beschleunigungskräfte auftreten. Dies muss bei der Berechnung der Greifkraft berücksichtigt werden, wobei zusätzlich zu beachten ist, dass das Greifobjekt bei starren Fingern nur mit Reibkraft gehalten wird.

Das Greifen eines Objektes kann dadurch verhindert werden, dass das Objekt nahe an einer Innenecke oder –kante liegt und Teile des Greifers seitlich zu weit über den Greifraum der Finger hinausragen, sodass der Greifer an eine Wand stößt wie in Abbildung 20 zu sehen ist.

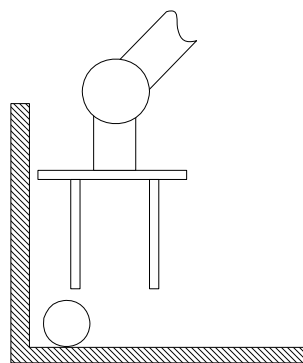


Abbildung 20: Greifen an Innenecken und -kanten

Mit dem Außengriff kann prinzipiell jede Bauteilgeometrie gehandhabt werden. Innengriff und Zwischengriff hingegen lassen sich nur für Werkstücke einsetzen, deren Form an mindestens einer Stelle geöffnet ist. Beim Innengriff setzen beide Greifarme an den Innenflächen eines Werkstücks an, beim Zwischengriff hingegen setzt ein

Greifarm an der Innenfläche des Werkstücks und der andere an der Außenfläche des Werkstücks an, wie in Abbildung 21 zu sehen ist [Kre03].

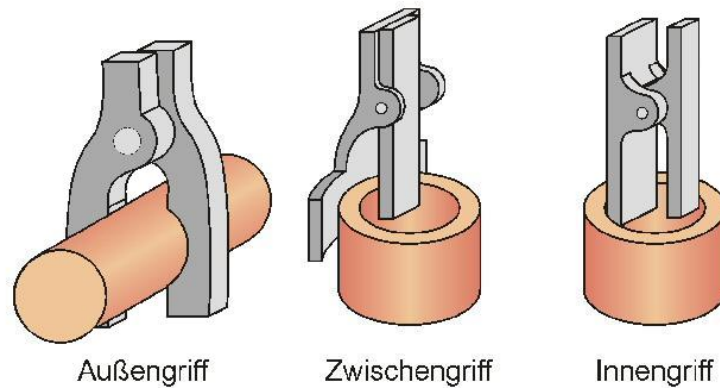


Abbildung 21: Vergleich der Greifarten

Nach dem Greifen besteht die Aufgabe des Greifers darin, das Objekt lediglich zu sichern und nicht intern zu manipulieren, das heißt, die Position und Orientierung innerhalb des Greifraums zu verändern.

Die Kräfte beim Fügen eines Holzdübels sind von Hörz [Hör98] untersucht worden. Dabei können in Abhängigkeit der Einpressgeschwindigkeit, der Dübelgeometrie und des Basisteilwerkstoffs Fügekräfte von bis zu 1600 N auftreten.

3.2.6 Ableitung von Anforderungen an Teil- und Gesamtsysteme

Antriebe lassen sich, je nach der räumlichen Anordnung im Greifsystem, als interne oder externe Antriebe differenzieren. Die Vorteile von internen Antrieben liegen vor allem in der höheren Genauigkeit und im geringeren baulichen Aufwand, da sie die Antriebsenergie direkt vor Ort umwandeln. Bei externen Antrieben muss die gewandelte Energie erst noch über aufwendige Betätigungszüge, Zahnräder oder Ähnliches übertragen werden. Durch die zusätzlichen Elastizitäten und die Reibung entstehen sowohl Ungenauigkeiten als auch Übertragungsverluste. Externe Antriebe sind hingegen in ihrer Baugröße und in ihrem Gewicht weniger eingeschränkt als interne. Dadurch ermöglichen sie leichtere Greifsysteme mit kleineren, kompakten Abmessungen, die gleichzeitig höhere Leistungen besitzen [See93]. Dem zu entwickelnden Greifer liegt natürlich auch der plug-and-play-Gedanke zugrunde, weshalb hier von vornherein nur interne Antriebe infrage kommen.

Greifer die eine Zugriffsbewegung ausführen, lassen sich in zwei wesentliche Gruppen einteilen:

- ♦ Greifer mit rotatorischer Zugriffsbewegung
- ♦ Greifer mit translatorischer Zugriffsbewegung.

Greifer mit rotatorischer Zugriffsbewegung haben den Nachteil, dass sich beim Zugreifen der Winkel zwischen den Greifflächen verändert. Hinzu kommen ungewollte translatorische Verschiebungen der Lage der zu greifenden Werkstücke bei der rotatorischen Bewegung um einen Hebelarm. Dies muss später bei der Programmierung der Bewegungsbahn berücksichtigt werden. Bei Greifern der Gruppe mit translatorischer Zugriffsbewegung sind diese Probleme weitaus geringer. Dadurch lassen sie sich leichter zum Greifen unterschiedlicher Werkstücke einsetzen [Kre03]. Aus diesem Grund ist die gewählte Zugriffsbewegung translatorisch.

In Kapitel 2.4.4 ist bereits beschrieben, dass nur drei Griffe notwendig sind, um ein großes Teilespektrum im industriellen Umfeld abdecken zu können:

- ♦ Zwei-Finger-Griff
- ♦ Drei-Finger-Parallelgriff
- ♦ Drei-Finger-Zentrischgriff.

Die IPA-Hand besitzt eine Kinematik, in der diese Griffe realisiert sind und die ihre hohe Flexibilität gegenüber sich ändernden Objektgeometrien bereits erfolgreich unter Beweis gestellt hat [Sch04]. Die Kinematik des zu entwickelnden Greifers ist in Abbildung 22 zu sehen und lehnt sich an die Kinematik der IPA-Hand an.

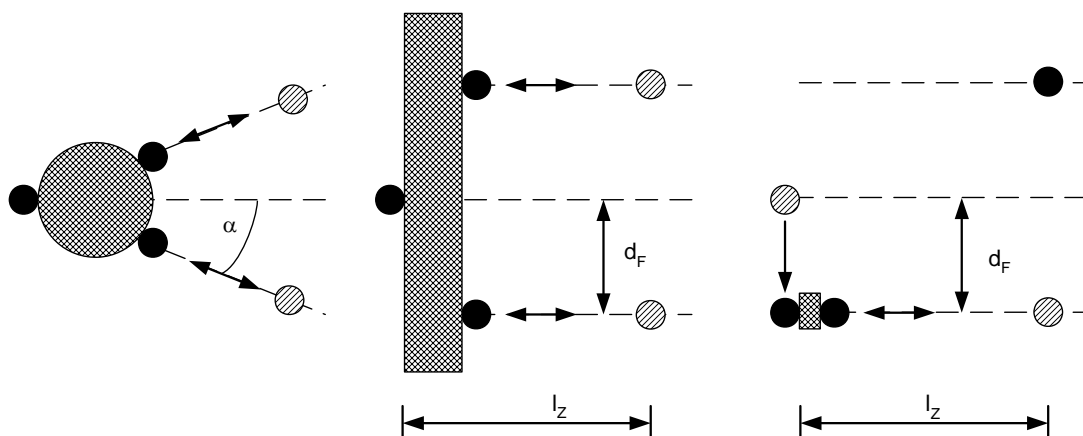


Abbildung 22: Kinematik des flexiblen Greifers

Der Greifer verfügt über einen Daumen und zwei Finger, die zusammen im Folgenden als Greifglieder bezeichnet werden. Der Daumen kann, wie rechts zu sehen ist, zwischen zwei festen Positionen verschoben werden. Er ist aber, bezogen auf die Richtung der Greifkraft, starr angeordnet. Durch das Verschieben des Daumens wird zwischen den Konfigurationen Zwei-Finger-Griff, bei dem der Daumen einem Finger gegenübersteht, und Drei-Finger-Parallelgriff gewechselt, bei dem sich der Daumen mittig zwischen beiden Fingern befindet. Die Finger führen die translatorische Zugriffsbewegung entlang linearer Achsen aus. Beim Drei-Finger-Parallelgriff und Drei-Finger-Zentrischgriff werden beide Finger bewegt, beim Zwei-Finger-Griff nur einer. Die Achsen können in der Ebene geschwenkt werden, sodass sie entweder jeweils in Richtung Daumen zeigen, was in der Abbildung links zu sehen ist, oder parallel zueinander angeordnet sind, was in der Abbildung in der Mitte und rechts zu sehen ist. Beim Drei-Finger-Parallelgriff bildet eine Fingerachse mit einer gedachten Mittelachse, die durch den Daumen verläuft, den Schwenkwinkel α . Andernfalls haben die Finger von Mittelachse den Abstand d_F . Durch das Schwenken der Finger wird zwischen dem Drei-Finger-Parallelgriff und dem Drei-Finger-Zentrischgriff gewechselt. Der Greifer muss in der Lage sein selbstständig zwischen den Konfigurationen hin und her zu schalten, d. h., die Fingerachsen müssen um den Schwenkwinkel α gedreht und der Daumen um die Strecke d_F verschoben werden. Die maximale Länge der Zugriffsbewegung ist die Strecke l_Z .

Mit dem Drei-Finger-Parallelgriff können lange, zylindrische oder kubische Objekte gegriffen werden. Der Zwei-Finger-Griff wird zum Greifen flacher, kleiner Objekte angewendet. Der Drei-Finger-Zentrischgriff dient zum Aufnehmen runder Objekte [Sch04].

Die Anforderungen an das Informationsverarbeitungssystem sind:

- ♦ Kommunikation mit dem Zellenrechner
- ♦ Überprüfen der Konfiguration des Greifers
- ♦ Überprüfen, ob ein Objekt gegriffen worden ist
- ♦ Steuern der Fingerantriebe und der Antriebe zum Konfigurieren des Greifers.

Die Greifersteuerung erhält vom Zellenrechner zum einen das Signal eine bestimmte Konfiguration einzunehmen und zum anderen das Signal, ein Objekt zu greifen bzw. zu lösen. Die Greifersteuerung führt dies durch Betätigung der entsprechenden Antriebe

aus und meldet dem Zellenrechner den Status der Konfiguration und des Greifzustandes zurück.

3.2.7 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste für den flexiblen Greifer ist in Tabelle 5 auf der nächsten Seite zu sehen. Forderungen sind mit (F) und Wünsche mit (W) gekennzeichnet.

3.3 Analyse der Greifaufgabe der Saugspinne

Die Aufgabe der Saugspinne besteht allgemein in der Handhabung mittlerer und großer, flächiger Objekte und im Speziellen in der Handhabung von Leimholzplatten. Die Forderung nach plug-and-play-Fähigkeit gilt natürlich auch für die Saugspinne.

Lösungen für diese Art von Handhabungsaufgaben sind bereits Stand der Technik und werden üblicherweise durch Sauggreifer realisiert, für die es bei verschiedenen Herstellern Baukastensysteme gibt. Deshalb existiert schon vor der Analyse eine relativ genaue Zielvorstellung von der Lösung. Die Arbeitsschritte zur Realisierung der Saugspinne sind nach der Analyse daher auch nicht Konzeption und Entwicklung sondern vielmehr Entwurf und Dimensionierung.

3.3.1 Saugspinne und Komponenten

Die Saugspinne besteht aus einem Trägersystem, an dem die Komponenten, unter anderem mehrere Saugnäpfe, befestigt sind. Die Saugnäpfe werden von einem Vakuumerzeuger mit Unterdruck versorgt, können aber bei Bedarf durch Ventile einzeln von der Steuerung abgeschaltet werden. Da sich die Saugnäpfe an Beinen unterhalb des Trägersystems befinden, erinnert die Form des Greifers an eine Spinne. Die Saugspinne ist über ein Werkzeugwechselsystem mit dem Industrieroboter verbunden.

Tabelle 5: Anforderungsliste des flexiblen Greifers

Nr.	Anforderung	F/W
	<i>Gesamtsystem</i>	
1	Greifen kleiner und mittlerer Objekte variabler Geometrie	F
2	plug-and-play-Fähigkeit	F
3	Greifen von Objekten nahe an Ecken und Kanten	W
4	Baugröße und Gewicht gering	W
5	Masse der Greifobjekte bis 1 kg	F
6	Beschleunigungs- und Bearbeitungskräfte, zweifache Sicherheit	F
	<i>Trägersystem</i>	
7	Kompatibel zum Werkzeugwechselsystem	F
	<i>Antriebssystem</i>	
8	Energieform: Druckluft bis 8 bar	F
9	Verwendung herkömmlicher Pneumatikantriebe	F
10	integrierte Antriebe	F
	<i>kinematisches System</i>	
11	Drei-Finger-Parallel- und -Zentrischgriff, Zwei-Finger-Griff	F
12	translatorische Zugriffsbewegung	W
13	Außen-, Zwischen- und Innengriff	W
	<i>Wirksystem</i>	
14	Aufbringen der Greifkraft mit starren oder flexiblen Fingern	F
	<i>Informationsverarbeitungssystem</i>	
15	Kommunikation mit dem Zellenrechner	F
16	Überprüfen der Greiferkonfiguration	F
17	Überprüfen ob Objekt gegriffen wurde	F
18	Steuerung der Antriebe	F

3.3.2 Analyse der Greifobjekte

Die Saugspinne soll zwar in der Lage sein, die verschiedensten flächigen Objekte handhaben zu können, wird aber speziell auf rechteckige Leimholzplatten ausgelegt. Die Mindestabmaße der Platten betragen 200x300 mm, die Höchstmaße der Platten betragen 600x800 mm bei einer Plattendicke von maximal 18 mm.

Die Dichte ρ ist abhängig von der Holzart und variiert zwischen 0,5 und 1,2 g/cm³. Damit ergibt sich für die maximale Masse einer Leimholzplatte:

$$m_{pl} = l * b * h * \rho = 80cm * 60cm * 1,8cm * 1,2 \frac{g}{cm^3} = 10368g \approx 10,4kg .$$

Die Saugspinne wird auf eine Masse der Greifobjekte von 11 kg ausgelegt.

3.3.3 Anforderungen an Teil- und Gesamtsysteme und Anforderungsliste

Beim Handhaben der Platten können prinzipiell die gleichen Beschleunigungen auftreten wie beim flexiblen Greifer, eine Bearbeitung während des Handhabens kann ausgeschlossen werden. Da die Beschleunigungen auch tangential zur Oberfläche auftreten können, werden die Saugnäpfe auf Haftreibung ausgelegt. Die Saugspinne muss das Greifobjekt ebenfalls mit zweifacher Sicherheit halten.

Tabelle 6: Anforderungsliste der Saugspinne

Nr.	Anforderung	F/W
	<i>Gesamtsystem</i>	
1	Greifen mittlerer und großer flächiger Objekte	F
2	plug-and-play-Fähigkeit	F
	<i>Saugnapfberechnung</i>	
3	Masse der Greifobjekte bis 11 kg	F
4	Beschleunigungskräfte, Reibung und zweifache Sicherheit	F
	<i>Vakuumerzeugung</i>	
5	integriert in Saugspinne	F
6	Energieform: Gleichstrom bis 24 V und/oder Druckluft bis 8 bar	F
	<i>Trägersystem</i>	
7	Kompatibel zum Werkzeugwechselsystem	F
	<i>Steuerung</i>	
8	Kommunikation mit dem Zellenrechner	F
9	An- und Abschalten einzelner Saugnäpfe	F

4 KONZEPTION UND ENTWICKLUNG EINER VORRICHTUNG ZUR AUFNAHME VON AKKUSCHRAUBERN

4.1 Vorgehensweise

Zunächst werden die Konzepte für die einzelnen Teilsysteme der Aufnahmevorrichtung und teilweise auch für einzelne Anforderungen an die Teilsysteme vorgestellt und deren Vor- und Nachteile dargelegt. Dies ist besonders dort wichtig, wo es mehrere Konzepte zur Lösung einer Aufgabe gibt. Als Grundlage beim Konzipieren selbst dient die Anforderungsliste. Aus diesen Konzepten werden Kombinationen ausgewählt und zu Gesamtkonzepten weiterentwickelt. Anschließend werden die Komponenten für die Gesamtkonzepte ausgewählt und dimensioniert, worauf die Ausarbeitung der Konstruktionen erfolgt. Zum Schluss werden beide Konstruktionen bewertet und eine zur Weiterentwicklung ausgewählt.

4.2 Konzeption des Spannsystems

4.2.1 Aufbringen der Spannkraft

Der Akkubohrschrauber wird zwischen zwei Formelementen positioniert, von denen sich eins an der Vorderseite und eins an der Rückseite befindet. Damit der Bohrschrauber axial und radial fixiert ist, muss die Spannkraft die beiden Formelemente entweder gegeneinander ziehen oder gegeneinander drücken.

Eins von beiden Formelementen muss in axialer Richtung verschiebbar sein, da erstens der Bohrschrauber nur auf diese Weise zwischen die Formelemente gebracht werden kann und zweitens die Motorgehäuse unterschiedlich lang sind, wodurch die Formelemente im gespannten Zustand bei jedem Bohrschrauber einen anderen

Abstand haben müssen. Damit die Bohrfutter ungefähr den gleichen Abstand vom Handflansch des Roboters haben und sich der TCP beim Wechseln nicht so stark verschiebt, wird das vordere Formelement am Trägersystem befestigt. Das hintere Formelement ist in axialer Richtung verschiebbar und wird am Trägersystem geführt. Der Verstellbereich wird auf mindestens 80 mm festgelegt, von denen 33 mm auf die Differenz der Längen der Motorgehäuse entfallen und der Rest als Freiraum beim Einspannen dient.

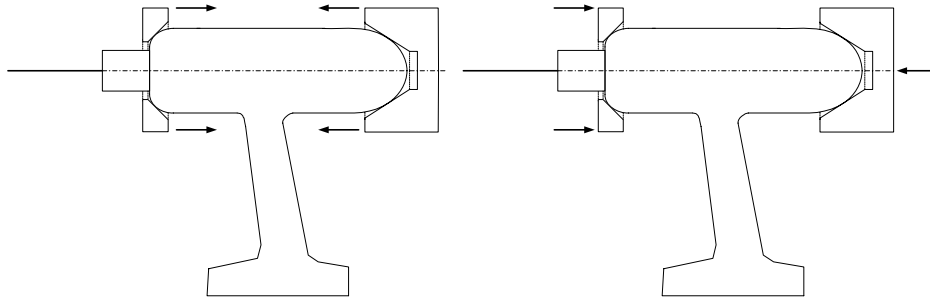


Abbildung 23: Bohrschrauber zwischen zwei Formelementen

Das vordere Formelement ist ein trichterförmiger Ring, dessen Innendurchmesser größer ist als der Außendurchmesser des größten Bohrfutters. Die Kontur der trichterförmigen Innenwand des Rings ist so gestaltet, dass sie alle sich verjüngenden Vorderseiten der Akkubohrschrauber linienförmig auf dem Umfang berührt. Aus Tests im CAD ist ersichtlich, dass eine Ringform zu allen nachmodellierten Bohrschraubertypen passt.

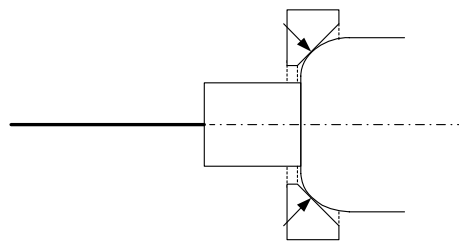


Abbildung 24: vorderes Formelement

Beim hinteren Formelement ist das jedoch leider nicht der Fall, da die Rückseiten der Motorgehäuse entweder abgerundet oder grade oder schräg abgeflacht sind und vom Formelement auch Seitenkräfte aufnehmen müssen, um den Bohrschrauber radial zu fixieren. Bei den abgerundeten und den grade abgeflachten Motorgehäusen lässt sich dies ebenfalls durch ein trichterförmiges Formelement realisieren, das die Rückseite entlang einer Kreislinie berührt. Für die schräg abgeflachten Motorgehäuse ist ein Element nötig, dessen Innenform die Rückseite fixiert, indem es die abgewinkelte Fläche und die Unterseite des Motorgehäuses berührt. Der Winkel der schrägen Fläche auf der Innenseite des Formelements muss auf den jeweiligen

Bohrschraubertyp einstellbar sein. Die beiden Formelemente müssen dann gegeneinander ausgetauscht werden, wenn ein Bohrschraubertyp mit einer entsprechend anderen Rückseite in der Vorrichtung aufgenommen werden soll.

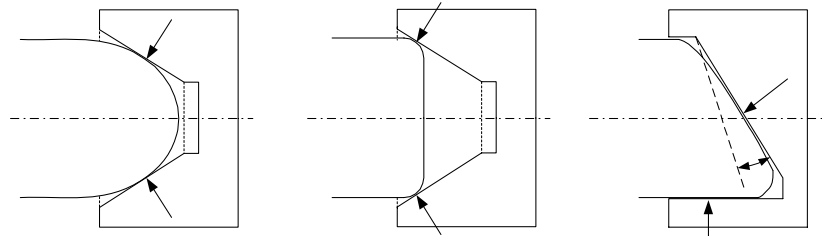


Abbildung 25: hintere Formelemente

4.2.2 Erzeugen der Spannkraft

Die Spannkraft kann entweder nur passiv oder kombiniert passiv und aktiv erzeugt werden und die Formelemente zusammenziehen oder zusammendrücken. Eine rein passive Spannkraft wird beim Einspannen erzeugt und erst bei der Entnahme des Bohrschraubers aus der Vorrichtung wieder aufgehoben. Dies ist auch beim passiven Anteil bei der kombinierten Erzeugung der Spannkraft der Fall. Der, durch Antriebe erzeugte, aktive Anteil hingegen wirkt nur, während die Vorrichtung mit dem Industrieroboter verbunden ist.

Das eine passive Konzept ist, den Bohrschrauber mit einer Feder zu spannen. Das hintere Formelement ist fest mit einer Platte verbunden, die an Stangen geführt wird. Auf jeder der Stangen befindet sich eine Druckfeder, die mit einer Seite gegen das Trägersystem und mit der anderen gegen die Platte drückt. Die Federn sind parallel angeordnet, wodurch sich die Federkräfte addieren.

Zum Einsetzen oder Entnehmen eines Bohrschraubers wird die Platte mit einem Hebel zurückgedrückt. Der Hebel ist nötig, um die Kraft des Bedieners zu verstärken, da die Federn zusammen eine Spannkraft von mehr als 300 N aufbringen müssen. Die Drehachse des Hebels ist mit dem Trägersystem verbunden und der Kraftansatzpunkt mit der Platte. Damit lässt sich ein Hebelverhältnis von 1:4 bis 1:5 realisieren, wenn die Hebellänge nicht überproportional groß werden soll. Auf diese Weise ließe sich ein Bohrschrauber relativ schnell Einspannen, aufgrund des Hebelverhältnisses ist die Kraft die der Bediener aufbringen muss jedoch immer noch relativ hoch. Zudem ist die Spannkraft von der Länge des Bohrschraubers abhängig, da die Federn im gespannten Zustand von einem längeren Bohrschrauber stärker zusammengedrückt

werden. Nachteilig ist auch, dass die Platte auf den Stangen auf großer Länge sehr genau geführt werden muss, um ein Verkappen und damit ein Verklemmen zu verhindern.

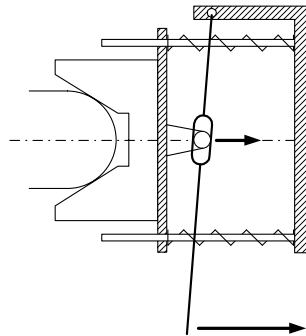


Abbildung 26: Aufbringen der Spannkraft mittels Feder

Beim zweiten passiven Konzept wird das Formelement mit einer Schraube gespannt. Es ist an einer Platte geführt, die wiederum am Trägersystem geführt wird und an diesem festgeklemmt werden kann. Zum Einspannen wird die Platte mit dem Formelement von Hand locker gegen den Bohrschrauber gedrückt und mit Klemmhebeln von Hand festgeklemmt. Mit einer Schraube, die durch ein Gewinde in der Platte geht, wird das Formelement gegen den Bohrschrauber festgezogen. Damit auch das Festziehen von Hand möglich ist, wird eine Schraube mit Sterngriff verwendet.

Während die Führungslänge des Formelements an der Platte sehr kurz ist, muss die Platte am Trägersystem über einen größeren Verstellbereich geführt werden, um das Einspannen und Entnehmen zu ermöglichen. Da die Platte von Hand bewegt wird, muss die Führung jedoch nicht besonders genau sein. Die Vorteile dieses Konzeptes liegen im einfachen Aufbau und der geringen Kraft, die zum Spannen benötigt wird. Nachteilig ist jedoch, dass erstens die Spannkraft nicht genau bekannt ist und zweitens der Einspannvorgang etwas komplizierter ist als bei der ersten Variante.

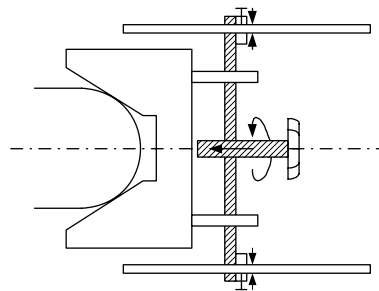


Abbildung 27: Aufbringen der Spannkraft mittels Schraube

Die passive Komponente bei einer kombinierten Erzeugung der Spannkraft kann wie beim ersten Konzept durch Federkraft erzeugt werden, wobei ein Hebel zum

Zurückdrücken der Platte unnötig ist, da die Federkraft nur ca. 30 N beträgt. Bei der Erzeugung der aktiven Spannkraftkomponente stehen als Energieformen für die Antriebe Druckluft bis 6 bar und Gleichstrom bis 24 V zur Verfügung.

Gleichstrommotoren und Schrittmotoren haben jedoch den Nachteil, dass eine hohe Wärmeentwicklung in den Motor- oder Aktuatorwicklungen auftritt, wenn sie ein Moment im Stillstand erzeugen sollen. Grundsätzlich ist hier der Einsatz eines selbsthemmenden Getriebes denkbar wie, beispielsweise einer Spindel. Eine derartige Lösung ähnelt dem Konzept mit der Spannschraube, hat aber den Nachteil eines zusätzlichen Antriebs, der nur zum Einspannen und Entnehmen gebraucht wird, weshalb dieses Konzept nicht weiter verfolgt wird.

Die zweite Möglichkeit für die Erzeugung der aktiven Spannkraftkomponente ist die Verwendung von Pneumatikzylindern. Ein Einbau, bei dem ein oder mehrere Zylinder hinter dem Bohrschrauber angebracht sind und die Platte gegen diesen drücken ist ungünstig, da die Zylinder auch im eingefahrenen Zustand länger sind als ihr Hub und somit die gesamte Vorrichtung zu lang wird. Daher müssten zwei Pneumatikzylinder mit je 150 N Zugkraft rechts und links außen an der Vorrichtung angebracht werden und die Platte mit dem Formelement gegen den Bohrschrauber ziehen. Das Einspannen und Entnehmen des Bohrschraubers wäre auf diese Weise sehr einfach und schnell. Zylinder mit der gewünschten Zugkraft haben jedoch einen Durchmesser von ca. 30 mm, der auf beiden Seiten zur Breite der Vorrichtung hinzukommt. Da so der Forderung entgegen gewirkt wird, ein Loch auch in der Nähe einer Ecke oder Kante bohren zu können, scheidet auch diese Möglichkeit aus.

4.2.3 Sicherung gegen Verdrehen

Um den Bohrschrauber um die Motorachse zu orientieren und gegen Verdrehen zu sichern, werden zwei Anschläge eingesetzt, die an der rechten und linken Seitenfläche des Handgriffs ansetzen und diesen fixieren. Die Anschläge müssen entlang der Motorachse und senkrecht zu dieser verstellbar sein, damit die Flexibilität bezüglich der Breite des Griffs und dessen Abstandes zum Bohrfutter gewährleistet ist.

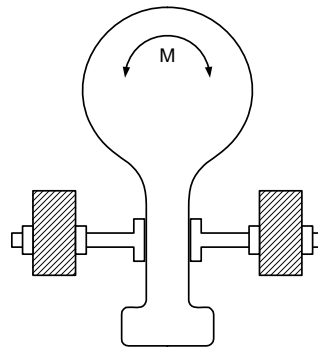


Abbildung 28: Sicherung gegen Verdrehen

4.3 Konzeption des Trägersystems

Das Trägersystem besteht aus drei Platten, die hintereinander angeordnet und über Streben miteinander verbunden sind. An der hinteren Platte ist das Werkzeugwechselsystem befestigt. An der vorderen Platte ist die Ringform befestigt, mit der der vordere Teil des Bohrschraubers fixiert wird. Um den Bohrschrauber durch die Ringform stecken zu können, ist in der Platte ein Loch von der Größe des Innendurchmessers der Ringform. Beide Platten sind über die Streben fest miteinander verbunden, während die mittlere Platte, an der das hintere Formelement befestigt ist, von den Streben geführt wird.

Beim Konzept der Federspannung werden als Verbindungsstreben drei runde Stangen eingesetzt, die wie in Abbildung 29 angeordnet sind und der mittleren Platte gleichzeitig als Führung dienen. Dazu ist die mittlere Platte mit Gleitlagern versehen. Anzahl und Anordnung der Stangen sind so gewählt, um der Forderung nach hoher Steifigkeit gerecht zu werden. Die Paralleltoleranz der Stangen muss sehr genau sein, damit ein problemloses Gleiten auf den Stangen möglich ist. Auf den Stangen befinden sich die Druckfedern, die sich an der hinteren Platte abstützen und die mittlere Platte gegen den Bohrschrauber drücken. Als Lagerung für den Hebel dienen Gleitlager, die mit Winkeln an der hinteren Platte befestigt sind. Da der Bohrschrauber beim Einspannen zwischen den beiden unteren Stangen hindurchgeführt wird, muss ihr Abstand größer sein als der größte Motorgehäusedurchmesser. Die Anschläge, die ein Verdrehen verhindern sollen, bestehen aus Stangen, die mit Kugelköpfen versehen sind und an den beiden unteren Verbindungsstangen verstellbar befestigt werden. Dazu werden Klemmböcke verwendet, die mit je zwei versetzten, senkrecht zueinander angeordneten, geschlitzten Bohrungen versehen sind.

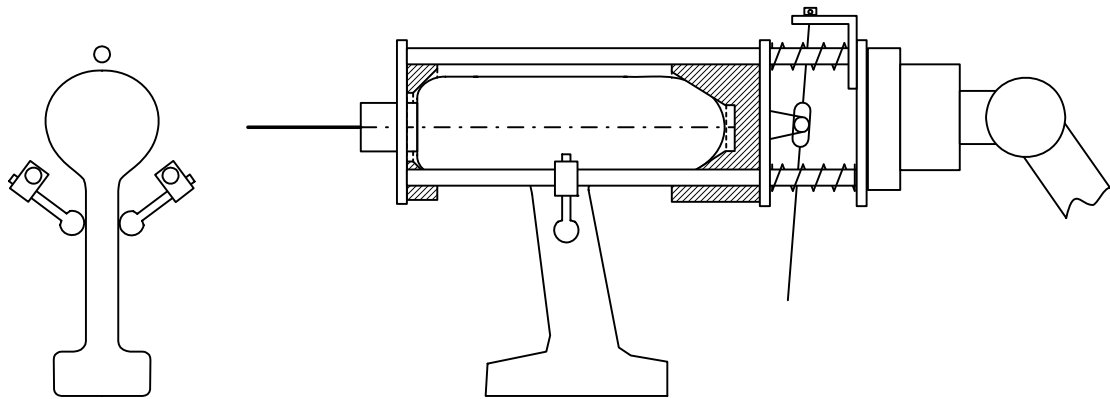


Abbildung 29: Konzept der Federspannung

Beim Konzept der Schraubenspannung werden zwei Aluminiumprofile als Verbindungsstreben verwendet, deren Nuten als Führung dienen. Alle zu verstellenden Teile werden mit Klemmhebeln gegen Nutensteine in den Profilen festgezogen und können von Hand gelöst werden um die Teile zu positionieren. Die Genauigkeit der Führung in den Profilenuten ist bei dieser Art der Einspannung ausreichend. Die Profile sind an der Unterseite der Vorrichtung angebracht und zur Erhöhung der Steifigkeit mit Winkeln an der vorderen und hinteren Platte befestigt. An der mittleren Platte befinden sich Winkel, die an den Profilen verstellbar werden können. Beim Einspannen wird der Bohrschrauber von oben in die Vorrichtung eingesetzt, sodass der Handgriff mit dem Akkupack zwischen den Profilen durchpassen muss. Die Anschläge gegen Verdrehen bestehen aus zwei Winkeln, die an den Aluprofilen verstellbar sind.

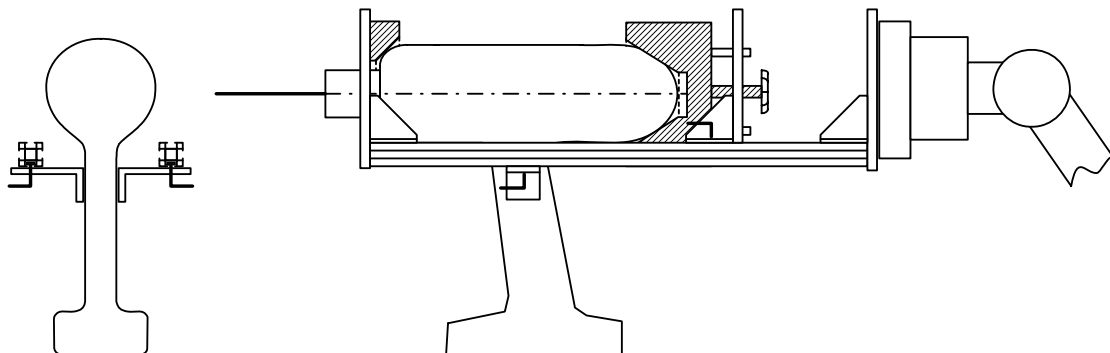


Abbildung 30: Konzept der Schraubenspannung

4.4 Konzeption des Betätigungssystems

Zum Einstellen der Drehzahl ist ein Aktor vorgesehen, der den Betätigungsknopf des Bohrschraubers drückt. Als Energiequellen für den Aktor des Betätigungssystems stehen Druckluft bis 6 bar und Gleichstrom bis 24 V zur Verfügung. Nach Tabelle 2 auf Seite 35 muss eine Betätigungskraft von mindestens 21 N über einen Weg von

mindestens 10 mm aufgebracht werden, um den Betätigungsknopf vollständig eindrücken zu können. Die Kraft bzw. das Moment oder der Weg bzw. der Drehwinkel des Aktors kann von einem Getriebe über- oder untersetzt werden. Dies ist beispielsweise nötig, um ein Moment in eine Kraft zu wandeln oder wenn der Aktor nicht direkt am Betätigungsknopf positioniert werden kann. Es muss entweder die Betätigungskraft oder der Betätigungsweg steuerbar sein, wobei die Einstellung der Soll Drehzahl innerhalb einer Sekunde erreicht sein soll. Abbildung 31 zeigt ein Diagramm, in dem die möglichen Antriebskonzepte zu sehen sind.

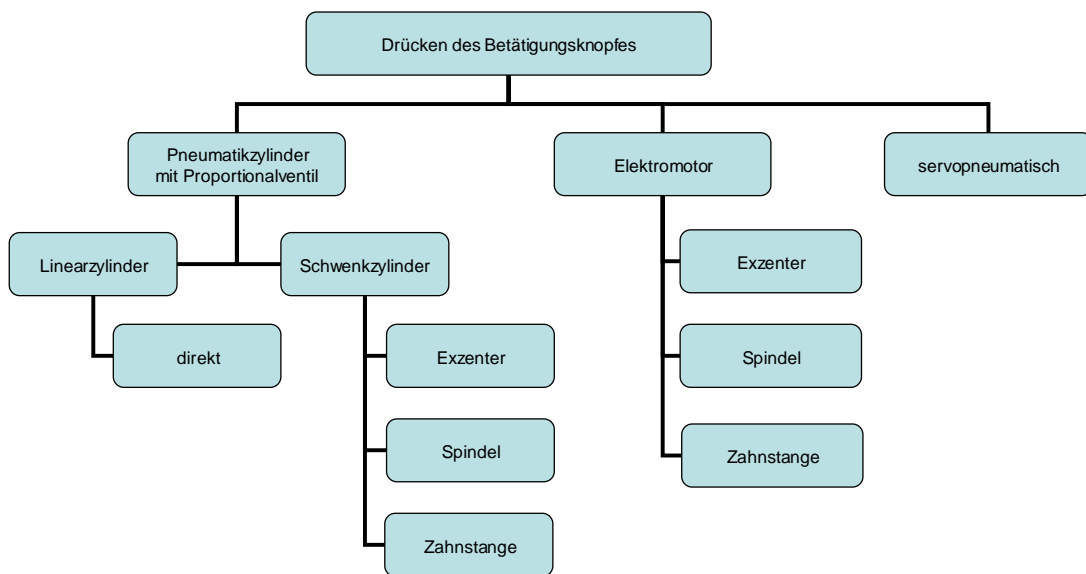


Abbildung 31: Konzepte zum Drücken des Betätigungsknopfes

Servopneumatische Antriebe eignen sich zwar prinzipiell hervorragend für eine Kraft- oder Positionsregelung, sind aber für diese Aufgabe wegen des hohen finanziellen Aufwands ungeeignet.

Eine Alternative stellt ein herkömmlicher, einfach wirkender Pneumatikzylinder in Kombination mit einem Proportionalventil dar. Ein Proportionalventil liefert einen Druck, der proportional ist zu einem, an das Ventil angeschlossenen, Spannungssignal. Der Zylinder kann sowohl ein Schwenk-, als auch ein Linearzylinder sein. Die Drehbewegung eines Schwenkzylinders muss allerdings in eine Linearbewegung des Betätigungsknopfes umgewandelt werden, wofür beispielsweise Exzenter, Spindeln oder Zahnstangen eingesetzt werden können. Erstens bedeutet dies einen konstruktiven, baulichen und finanziellen Zusatzaufwand und zweitens ist die Baugröße eines Schwenkzylinders in Bezug auf die erzeugbare Leistung größer als die eines Linearzylinders. Dieser benötigt kein Getriebe und kann aufgrund seiner geringen Größe direkt vor dem Betätigungsknopf positioniert werden.

Als Elektromotoren können Gleichstrom- oder Schrittmotoren eingesetzt werden, wobei Letztere besser zum Positionieren geeignet sind. Wie beim Schwenkzylinder muss die Drehbewegung eines Elektromotors allerdings in eine Linearbewegung des Betätigungsknopfes umgewandelt werden, weswegen hier die gleichen Nachteile auftreten.

Aufgrund seiner eindeutigen Vorteile wird das Konzept des pneumatischen Linearzylinders realisiert. Bei der Variante der Federspannung geschieht die Positionierung des Zylinders mit einem Klemmblock, der an einer der beiden unteren Verbindungsstangen befestigt wird. Beim Konzept der Schraubenspannung wird der Zylinder auf einer Brücke angeordnet, die aus einem Aluminiumprofil mit zwei Winkeln besteht und an den beiden Verbindungsprofilen parallel zur Motorachse verschiebbar ist. Um den Abstand des Zylinders senkrecht zur Motorachse einstellen zu können, ist dieser senkrecht zur Brücke verschiebbar.

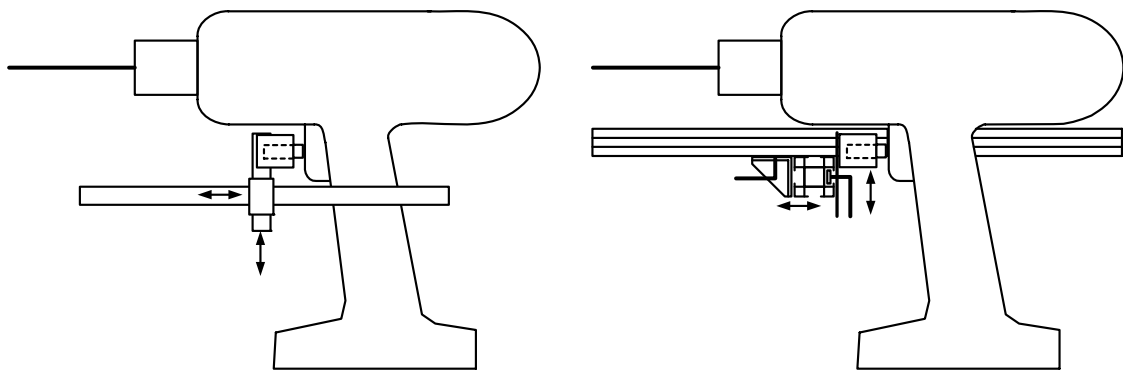


Abbildung 32: Betätigungskonzept mit Pneumatikzylinder

4.5 Konzept der Werkzeugsteuerung und Sensorik

Die Werkzeugsteuerung überwacht und regelt die, für den Bohrprozess, relevanten Parameter Drehzahl und Vorschubkräfte und -momente.

Die erste Möglichkeit die Vorschubkraft zu überwachen, besteht darin, Kraftsensoren am hinteren Formelement oder an der hinteren Platte der Vorrichtung zu installieren. Das Signal wird an die Werkzeugsteuerung übermittelt, die wiederum unzulässige Werte dem Zellenrechner meldet, wodurch der Vorschub geändert wird. Diese Methode ist relativ preiswert, ein Moment, das auftritt, wenn der Vorschub während des Bohrens nicht parallel zur Motorachse ist, kann dadurch jedoch nicht erfasst werden.

Die zweite Möglichkeit ist die Installation eines Kraft-Moment-Sensors zwischen dem Handflansch des Roboters und dem roboterseitigen Werkzeugwechselsystem und der Übermittlung der Signale direkt an den Zellenrechner. Dies ist zwar teurer, es können aber Kräfte und Momente aufgenommen werden. Zusätzlich kann auch beim Einsatz der anderen Werkzeuge auf den Sensor zurückgegriffen werden und die Reaktionszeit zum Ändern des Vorschubs wird herabgesetzt, da der Umweg über die Werkzeugsteuerung entfällt.

Zum Einstellen der Drehzahl wird ein Regelkreis gemäß Abbildung 33 eingesetzt.

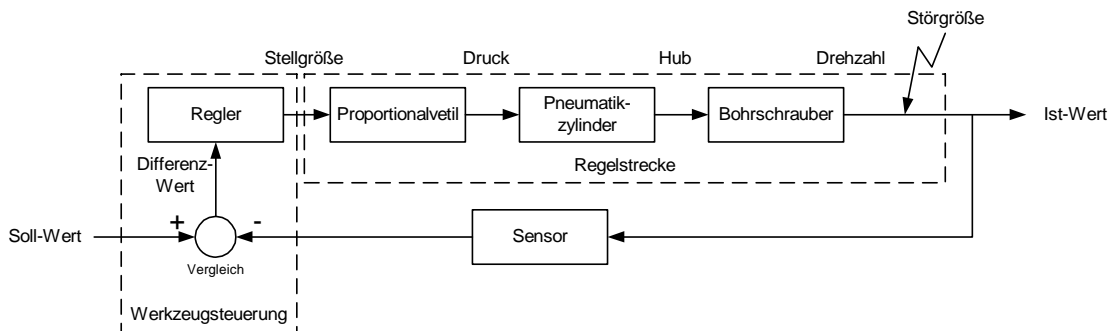


Abbildung 33: Regelkreis zur Drehzahlregelung

Der Soll-Wert der Drehzahl wird an die Werkzeugsteuerung übergeben und von dieser mit dem Ist-Wert verglichen, wobei ein Differenzwert das Ergebnis ist. Von einem Regler innerhalb der Steuerung wird eine Stellgröße errechnet und an das Proportionalventil weitergegeben. Vom Proportionalventil wird entsprechend der Druck geändert, worauf der Zylinder seinen Hub und der Bohrschrauber seine Drehzahl ändert. Der Bereich zwischen Stellgröße und Ist-Wert ist die Regelstrecke. Irgendwo an der Regelstrecke können Störgrößen angreifen und den Ist-Wert beeinflussen. Hierzu ist beispielsweise der Widerstand zu nennen, der beim Bohren auftritt und ein Absinken der Drehzahl zur Folge hat. Die Ist-Drehzahl wird mit einem Sensor gemessen und an die Steuerung übermittelt, woraufhin die Stellgröße angepasst werden kann.

Der Sensor erfasst die Drehzahl entweder durch Zählen von Inkrementen am Bohrfutter und Ableiten nach der Zeit oder durch messen der Umfangsgeschwindigkeit des Bohrfutters und Teilen durch dessen Radius. Dazu muss der Sensor an der vorderen Platte angebracht sein, weshalb der Bauraum in Richtung der Motorachse sehr klein sein muss. Abbildung 34 auf der nächsten Seite zeigt die verschiedenen Sensorkonzepte.

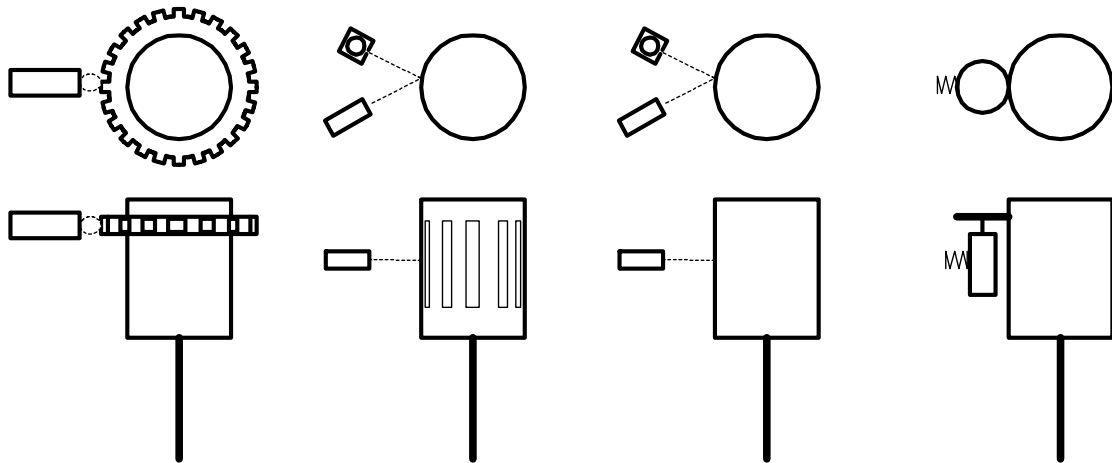


Abbildung 34: Sensorkonzepte zur Drehzahlmessung

Das Zählen von Drehinkrementen kann mit einem kapazitiven oder induktiven Sensor (im Bild links) oder optisch mit einem Reflexionslichttaster geschehen (2. v. li.). Hierfür muss der Bohrschrauber jedoch vorbereitet werden, beispielsweise durch Anbringen eines gezackten Metallrings oder Aufkleben von Reflexmarken am Bohrfutter. Dies widerspricht jedoch der plug-and-play-Forderung, weswegen das direkte Zählen von Inkrementen ausscheidet.

Das Messen der Umfangsgeschwindigkeit kann berührungslos mit einem optischen Sensor (2. v. re.), wie er in Computermäusen verwendet wird, oder taktil, mit einem Messrad und einem Tachogenerator oder einem Inkrementaldrehgeber (rechts), geschehen. Ein Maussensor scheidet aus, da er den Wertebereich, in dem sich die Umfangsgeschwindigkeit bewegt, nicht komplett erfassen kann. Es muss daher taktil gemessen werden, wobei dem Tachogenerator der Vorzug gegeben wird, da dieser ein Analogsignal liefert. Einem Inkrementaldrehgeber hingegen liefert eine Rechteckspannung, die wiederum nach der Zeit abgeleitet werden muss, was zulasten der Regelgeschwindigkeit geht. Das Messrad wird auf der Welle des Tachogenerators befestigt und mit diesem von einer Feder an das Bohrfutter gedrückt. Damit nur das Messrad das Bohrfutter berührt, muss es im Durchmesser größer sein als der Tachogenerator.

4.6 Auswahl und Auslegung der Komponenten

Auswahl und Auslegung der Komponenten geschehen zeitgleich mit der Konstruktion der Vorrichtung, da deren Kenngrößen, wie Abmessungen, Leistungen, Kräfte etc., auf den Aufbau Einfluss haben und umgekehrt.

Für den Betätigungszylinder sind ein Hub von 10 mm und eine Kraft von 21 N bei einem Betriebsdruck von 6 bar gefordert. Gewählt ist ein Kompaktzylinder des Typs CUJB 8-10 S der Firma SMC, mit einem Hub von 10 mm und einem Kolbendurchmesser von 8 mm. Laut Herstellerangaben erzeugt der Zylinder bei 6 bar eine Kraft von 30 N. Das Proportionalventil ist ein elektropneumatischer Regler vom Typ ITV 0050-3N-Q und ebenfalls von der Firma SMC. Es hat einen Regelbereich von 0,01-9 bar, wird mit 24 V betrieben und mit 0-10 V Gleichstrom gesteuert.

Der Tachogenerator soll eine Spannung von ca. 10 V bei einer Bohrschrauberdrehzahl von $1500 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ liefern. Dazu wird ein Tachogenerator vom Typ 2225 U4,3 G9 der Firma Faulhaber verwendet. Dieser hat eine Gesamtlänge von 32 mm und einen Durchmesser von 22 mm, als Messraddurchmesser wird 32 mm gewählt. Bei einem Bohrfutterdurchmesser von 47 mm ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von 1,47 und damit am Tachogenerator eine Maximaldrehzahl von ca. $2200 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$. Mit einer spezifischen Generatorspannung k_E von $4,3 \text{ mV} \cdot \text{U} \cdot \text{min}^{-1}$ liegt das Spannungssignal zwischen 0 und 9,46 V.

Da die steuerungstechnischen Aspekte nur am Rande betrachtet werden, ist die Werkzeugsteuerung bereits vorgegeben. Es wird eine JetControl JC-241 der Firma Jetter eingesetzt, hinzukommen die Peripherie-Module JX2-IA4 (für analoge Eingänge) und JX2-OA4 (für analoge Ausgänge). Die JetControl ist in der Lage über Ethernet mit dem Zellenrechner zu kommunizieren.

Für das Konzept der Federspannung werden drei Druckfedern des Typs 62/4/5 der Firma Federntechnik Knörzer verwendet. Die Feder wird gewählt, da sie eine relativ geringe Federrate R_f von $1,08 \text{ N/mm}$ besitzt und sich somit die Spannkraft bei den unterschiedlichen Längen der Motorgehäuse nicht so stark ändert. Auf einen längeren Bohrschrauber wird eine höhere Spannkraft aufgebracht, da die Feder stärker zusammengedrückt wird. Eine Feder hat im voll belasteten Zustand eine Länge von l_n 56,7 mm und bringt dabei eine Maximalkraft F_n von 155 N auf.

Die Alu-Profile für das Konzept der Schraubenspannung haben die Abmessung 20x20 mm und sind von der Firma Bosch. Dazu kommen Winkel mit den Schenkellängen 20x20 mm und 40x40 mm und Nutensteine. Klemmhebel, Schraube mit Sterngriff und Kugelknöpfe werden von der Firma Norelem zugekauft.

4.7 Konstruktion der Vorrichtung

Aufbau und Funktionsweise der beiden Vorrichtungsvarianten sind bereits zu großen Teilen dargestellt. An dieser Stelle werden daher hauptsächlich Besonderheiten und Ergänzungen beschrieben.

4.7.1 Gemeinsamkeiten der Varianten

Alle selbst zu fertigenden Teile bestehen, wenn nicht anders erwähnt, aus Aluminium. Die drei Platten haben eine Dicke von 5 mm, die Formelemente sind aus PVC, die Werkzeugsteuerung und das Proportionalventil werden auf einer Hutschiene an der Seite der Vorrichtung befestigt.

Das Messrad besitzt einen kleinen Absatz, mit dem es auf der Welle des Tachogenerators festgeschraubt wird und einen großen Absatz, über den ein O-Ring geschoben wird der auf dem Bohrfutter abrollt. An den Tachogenerator ist ein Hebel geschraubt, mit dem dieser gegen das Bohrfutter gedrückt wird. Der Hebel ist zwischen einem Stellring und einem Federdorn gelenkig auf einer Stange gelagert. Auf dem Federdorn befindet sich eine Drehfeder, mit der die Andruckkraft für den Tachogenerator erzeugt wird. Dazu ist der eine Schenkel am Federdorn und der andere am Hebel befestigt ist. Die Stange ist teilweise mit einem Gewinde versehen und wird mit zwei Muttern an der vorderen Platte festgeschraubt.

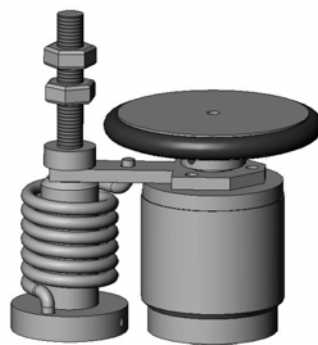


Abbildung 35: Tachogenerator mit Messrad und Hebel

4.7.2 Variante 1: Federspannung

Die Verbindungsstangen sind aus Silberstahl und haben einen Durchmesser von 8 mm. Die Gleitlager, die auf den Stangen geführt werden, sind aus Messing, haben

eine Länge von 60 mm und sind mit Hülsen an der mittleren Platte befestigt. Auf diese Weise kann die Länge der Vorrichtung verkürzt werden, da die Federn in den Hülsen versenkt werden, wenn die Platte zurückgedrückt wird, wie in Abbildung 36 zu sehen ist. Die Gleitlager dienen dabei gleichzeitig als Federdorn.

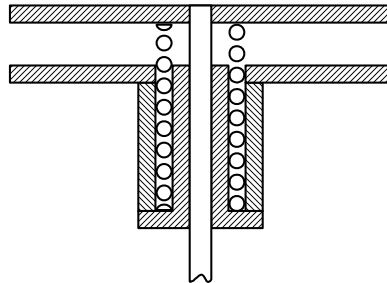


Abbildung 36: Versenkung der Federn in den Lagerhülsen

Der Spannhebel ist aus Stahl und besteht aus einer langen, einer kurzen Stange und einer Achse, die die Stangen drehmomentschlüssig miteinander verbindet. Die Achse ist in zwei Buchsen aus Messing drehbar gelagert, die mit Winkeln an der hinteren Platte befestigt sind. Auf die lange Stange wird von Hand die Kraft zum zurück drücken der mittleren Platte aufgebracht. Dazu sind an der mittleren Platte an der rechten und linken Seite Messingbolzen angebracht, die als Ansatzpunkte für die beiden Hebelstangen dienen. An beiden Stangen sind Aussparungen als Berührflächen eingefräst, auf denen die Messingbolzen gleiten. Damit der Hebel eine definierte Position hat während er nicht in Gebrauch ist, wird die lange Hebelstange in einer Halterung an der vorderen Platte festgeklemmt. Die Klemmstücke, mit denen die Kugelknöpfe und der Pneumatikzylinder positioniert werden, sind mit Flügelschrauben versehen, um ein Festziehen von Hand zu ermöglichen. In Abbildung 37 auf der nächsten Seite ist ein CAD-Modell der Vorrichtung in der Variante mit Federspannung zu sehen.

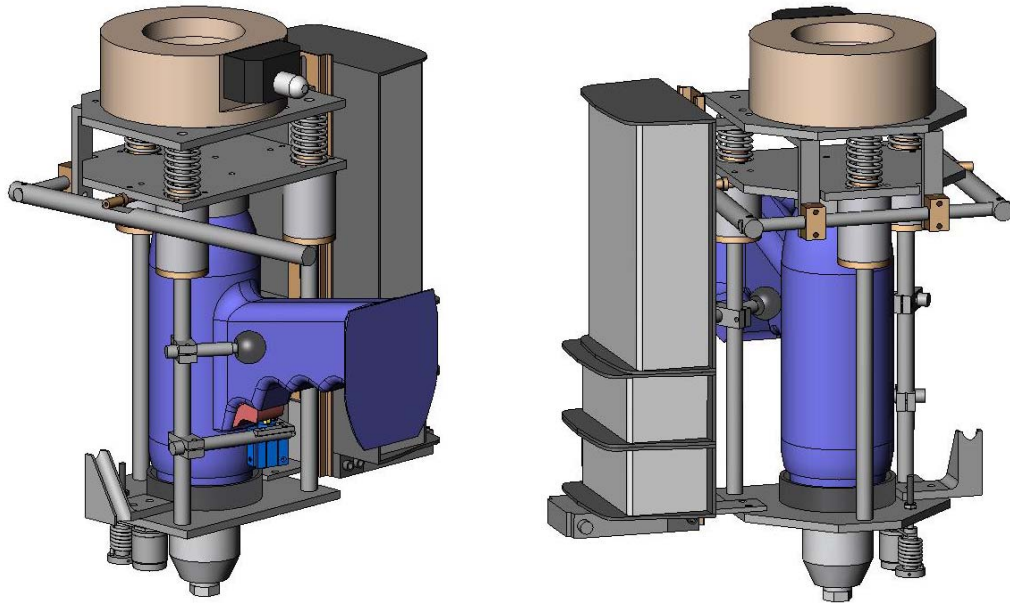


Abbildung 37: Bohrwerkzeug mit Federspannung

4.7.3 Variante 2: Schraubenspannung

In das hintere Formelement sind zwei Stangen eingeschraubt, die in Bohrungen in der mittleren Platte geführt werden. Auf den Stangen befinden sich Federn, die gegen das Formelement drücken und es in einer definierten Position halten, wenn kein Bohrschrauber in die Vorrichtung eingespannt ist.

Die Anschlagwinkel sind entlang der Aluprofile und senkrecht zu diesen verstellbar, um sowohl in Bezug auf den Abstand des Handgriffs vom Bohrfutter als auch auf dessen Dicke flexibel zu sein. Damit ein Schenkel, der als Anschlagfläche dient, stets parallel zu der Seitenfläche des Griffs ist, befinden sich in dem anderen Schenkel, der zur Befestigung dient, zwei parallele Langlöcher, die die Nut des Profils kreuzen. In dem einen Langloch befindet sich ein Bolzen, der bündig mit der Oberfläche des Schenkels abschließt, durch das andere Langloch wird der Klemmhebel gesteckt. Bolzen und Klemmhebel sind in den gleichen Nutenstein geschraubt. Der Pneumatikzylinder ist an einem Winkel befestigt, der auf der Brücke nach dem gleichen Prinzip verstellbar ist. In Abbildung 38 auf der nächsten Seite ist ein CAD-Modell der Vorrichtung als Variante mit Schraubenspannung zu sehen.

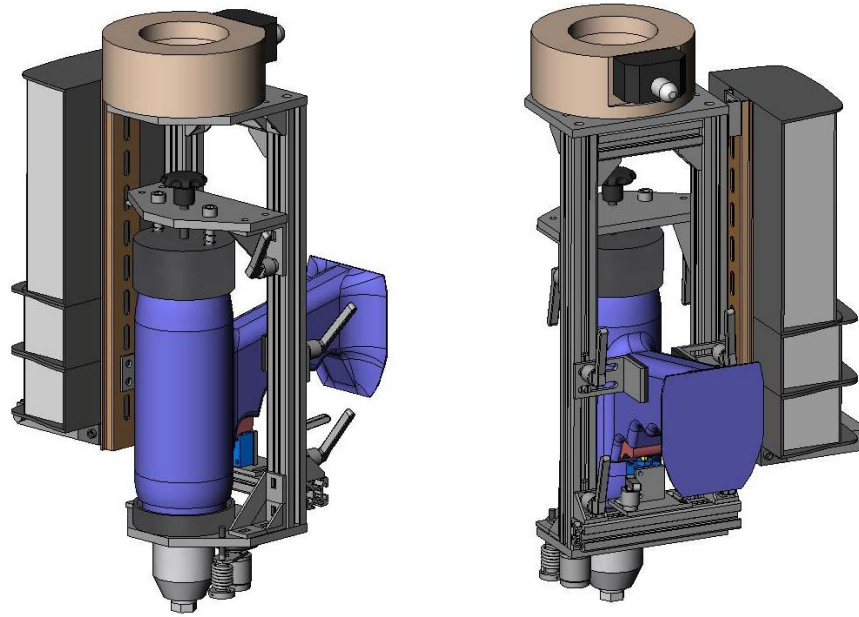


Abbildung 38: Bohrwerkzeug mit Schraubenspannung

5 KONZEPTION UND ENTWICKLUNG EINES FLEXIBLEN GREIFERS ZUR HANDHABUNG KLEINER UND MITTLERER OBJEKTE VARIABLER GEOMETRIE

5.1 Vorgehensweise

Zunächst werden die Konzepte für die einzelnen Teilsysteme des flexiblen Greifers vorgestellt, wobei wieder die Anforderungsliste als Grundlage dient. Da jeweils nur ein Lösungskonzept für ein Teilsystem vorgestellt wird, wird beim Konzipieren direkt darauf geachtet, dass die Lösungen miteinander kombinierbar sind und in ein Gesamtkonzept passen. Anschließend werden die Komponenten für das Gesamtkonzept ausgewählt und dimensioniert, worauf die Ausarbeitung der Konstruktion erfolgt.

5.2 Konzeption des kinematischen Systems

Zur Führung der Bewegungen von Daumen und Fingern werden Lineareinheiten, bestehend aus Linearschiene und Schlitten, verwendet. Die Linearschiene des Daumens wird starr am Trägersystem befestigt, die Linearschienen der Finger müssen jedoch in der Ebene drehbar gelagert sein. Drehachsen und Linearachsen stehen senkrecht zueinander und schneiden sich aus konstruktiven Gründen nicht.

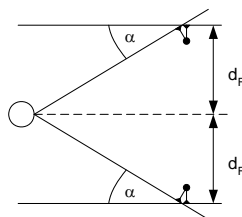


Abbildung 39: Grundkinematik des Greifers

Der Schwenkwinkel α , um den die Linearschienen gedreht werden, ist so zu wählen, dass ein rundes Objekt mit dem Drei-Finger-Parallelgriff möglichst stabil gegriffen wird. Dies ist im Allgemeinen der Fall, wenn die Berührungspunkte der Finger auf dem Umfang um jeweils 120° versetzt sind, wie in Abbildung 40 zu sehen ist.

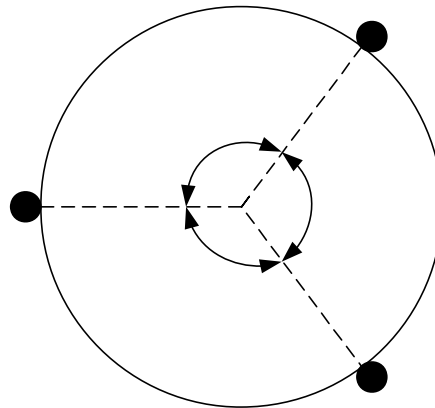


Abbildung 40: ideale Verteilung der Greiffinger

Der Greifwinkel γ ist der Winkel zwischen der Mittelachse und der Verbindungslinie vom Mittelpunkt des Greifobjekts zum Berührungspunkt des Fingers. Er lässt sich anhand der Skizze in Abbildung 41 berechnen.

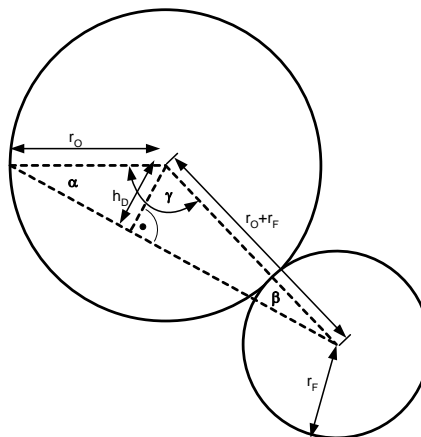


Abbildung 41: geometrische Verhältnisse beim Greifen

Gezeigt werden ein relativ kleines Greifobjekt und ein runder Greiffinger. Der Finger ist rund, da die Berechnung mit dieser Fingerform am einfachsten ist.

$$\gamma = 180^\circ - \alpha - \beta$$

Der Winkel β ist abhängig vom Objektradius r_O , dem Radius des Greiffingers r_F und dem Schwenkwinkel α :

$$r_O * \tan \alpha = h_D = (r_O + r_F) * \tan \beta$$

$$\Rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{r_O}{r_O + r_F} * \tan \alpha\right)$$

$$\Rightarrow \gamma = 180^\circ - \alpha - \arctan\left(\frac{r_O}{r_O + r_F} * \tan \alpha\right)$$

Mittels Tabellenkalkulation wird der Greifwinkel berechnet, wobei die Größe des Greifobjekts und der Schwenkwinkel variieren. Für den Fingerradius werden 5 mm gewählt. Tabelle 7 zeigt, dass der Greifwinkel mit zunehmendem Objektradius und zunehmendem Schwenkwinkel kleiner wird.

Tabelle 7: Berechnung des Greifwinkels

r_O [mm]	r_F [mm]	α [°]	β [°]	γ [°]
2,5	5	45	18,4	116,6
5	5	45	26,6	108,4
10	5	45	33,7	101,3
20	5	45	38,7	96,3
50	5	45	42,3	92,7
<hr/>				
2,5	5	40	15,6	124,4
5	5	40	22,8	117,2
10	5	40	29,2	110,8
20	5	40	33,9	106,1
50	5	40	37,3	102,7
<hr/>				
2,5	5	35	13,1	131,9
5	5	35	19,3	125,7
10	5	35	25,0	120,0
20	5	35	29,3	115,7
50	5	35	32,5	112,5

Die Einzelwerte bei verschiedenen Objektgrößen verteilen sich am gleichmäßigsten um den Idealwert 120°, wenn der Schwenkwinkel 35° beträgt. Wird anstatt einer runden eine eckige Fingerform eingesetzt, werden die Greifwinkel größer, wie in Abbildung 42 zu sehen ist. Dadurch wird auch der ideale Schwenkwinkel tendenziell größer.

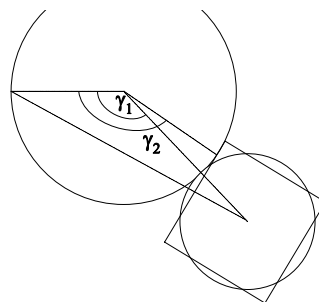


Abbildung 42: Vergleich der Greifwinkel bei runder und eckiger Fingerform

Um testen zu können, mit welchem Schwenkwinkel in der Praxis die besten Greifergebnisse erzielt werden, wird der Greifer so konzipiert, dass der Schwenkwinkel durch Umrüsten stufenlos zwischen 35° und 45° verstellt werden kann.

Wird jedoch nur der Schwenkwinkel verändert, zeigen die Fingerachsen nicht mehr zum Daumen, sondern auf eine andere Stelle auf der Mittelachse, wie links in Abbildung 43 zu sehen ist. Gleichzeitig kreuzen sich die Fingerachsen, was zu einer Kollision der Linearschienen führt. Damit die Linearachsen wieder Richtung Daumen zeigen, müssen die Drehachsen um die Strecke d_M entlang der Mittelachse verstellbar sein, wie in Abbildung 43 in der Mitte zu sehen ist. Um eine Kollision der Linearschienen zu vermeiden, müssen diese um die Strecke d_M entlang ihrer eigenen Achse verstellbar sein, wie in Abbildung 43 rechts zu sehen ist.

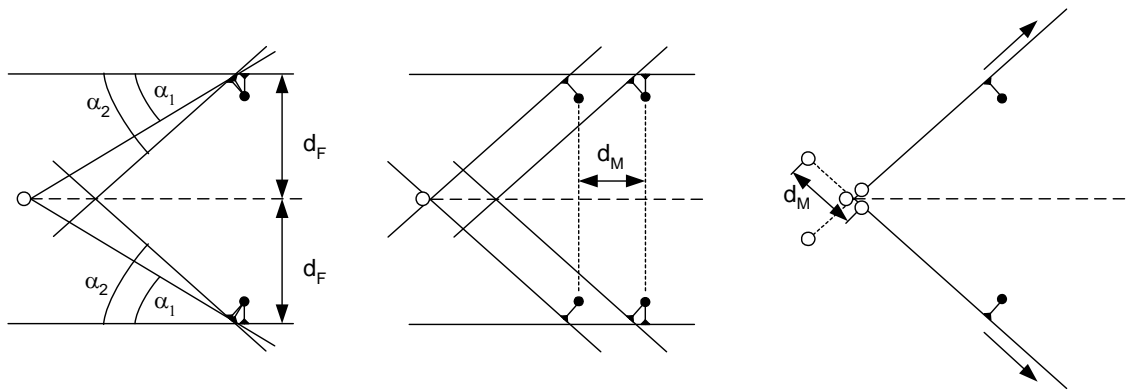


Abbildung 43: Anpassung der Kinematik an verschiedene Greifwinkel

Zum Schwenken der Fingerachsen wird ein pneumatischer Linearzylinder eingesetzt. Mit einem Schubstangengetriebe, wie es in Abbildung 44 zu sehen ist, wird aus der Linearbewegung des Schwenkzylinders die Schwenkbewegung der Fingerachsen. Da der Schwenkwinkel vom Hub des Zylinders abhängig ist, kann über einen Anschlag, der den Hub des Zylinders begrenzt, auch der Schwenkwinkel begrenzt werden.

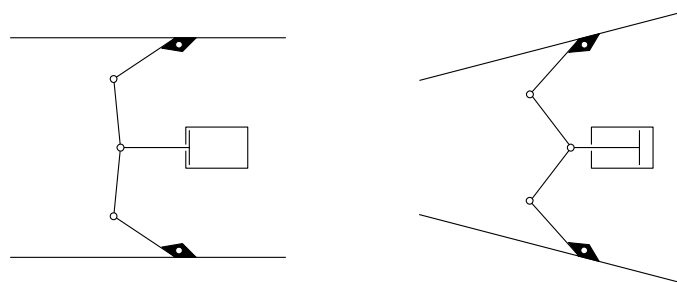


Abbildung 44: Schubstangengetriebe mit Pneumatikzylinder

Als Abstand der Finger von der Mittelachse d_F werden 45 mm gewählt, die Länge der Zugriffsbewegung der Finger l_z beträgt 80 mm. Dadurch lassen sich mit dem Drei-

Finger-Zentrischgriff Kugeldurchmesser bis 100 mm und mit dem Drei-Finger-Parallelgriff Objekte mit einer Breite von über 75 mm greifen.

5.3 Konzeption des Antriebssystems

Als Antriebe für den Greifer werden ausschließlich doppelwirkende Pneumatikzylinder eingesetzt, zwei Fingerzylinder, ein Daumenzylinder und ein Schwenkzylinder. Um die Zylinder einzeln betätigen zu können, muss der Greifer über vier 5/2-Wege-Ventile verfügen. Zusätzlich muss ein Strombegrenzungsventil eingebaut werden, das die Geschwindigkeit der Pneumatikzylinder herabsetzt.

5.3.1 Fingerzylinder

Der Hub der Fingerzylinder h_{ZF} muss entsprechend der Zugriffsbewegung 80 mm sein. Die Greifkraft F_G , die ein Finger aufbringen muss, wenn das Greifobjekt die Beschleunigung a erfährt und nur durch Reibschluss gehalten wird, lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$F_G = \frac{m_O * a * s}{\mu_H}$$

Dabei ist s der Sicherheitsfaktor und μ_H der Haftreibungskoeffizient.

Beim Handhaben mit einem herkömmlichen Sechs-Achs-Knickarmroboter ist die höchste Beschleunigung a_{max} die Zentrifugalbeschleunigung, die auftreten, wenn der Roboter den voll ausgestreckten Arm mit maximaler Winkelgeschwindigkeit ω_{Rmax} um die erste Achse dreht. Mit der Armlänge l_{AR} lässt sich die Beschleunigung Berechnen als:

$$a_{max} = \omega_{Rmax}^2 * l_{AR}$$

Für zwei Roboter der Firma KUKA wird die maximale Beschleunigung exemplarisch berechnet. Einen KR 16 für kleine und einen KR 30-3 für mittlere Lasten. Die Werte sind den Roboterdatenblättern entnommen. Die Winkelgeschwindigkeit ist in $^\circ/s$ angegeben und muss mit dem Faktor $\pi/180^\circ$ in rad/s umgerechnet werden.

$$KR16: a_{\max} = \left(156 \frac{\circ}{s} * \frac{\Pi}{180^\circ}\right)^2 * 1,611m = 7,41 \frac{1}{s^2} * 1,611m = 11,94 \frac{m}{s^2}$$

$$KR30-3: a_{\max} = \left(140 \frac{\circ}{s} * \frac{\Pi}{180^\circ}\right)^2 * 2,033m = 5,97 \frac{1}{s^2} * 2,033m = 12,14 \frac{m}{s^2}$$

Als maximale Beschleunigung wird 13 m/s^2 gewählt. Der Sicherheitsfaktor für das Handhaben ist mit 2 festgelegt. Für den Haftreibungskoeffizient wird ein Wert von 0,7 festgesetzt. Dazu müssen die Finger später eventuell mit einem entsprechenden Material beklebt werden. Die minimale Greifkraft $F_{G\min}$, mit der die Fingerzylinder zugreifen müssen, lässt sich berechnen als:

$$F_{G\min} = \frac{m_o * a_{\max} * s}{\mu_H} = \frac{1,5kg * 13 \frac{m}{s^2} * 2}{0,7} = 55,7N .$$

5.3.2 Daumenzylinder und Schwenkzylinder

Dem Daumenzylinder wirkt im Prinzip nur die Reibkraft des Schlittens auf der Linearschiene entgegen, da die gemeinsame Greifkraft der Finger senkrecht zur Bewegungsrichtung des Daumens steht und von der Schiene abgefangen wird. Der Hub des Daumenzylinders h_{zD} muss 45 mm betragen.

Die Kraft F_{zS} und der Hub h_{zS} des Schwenkzylinders hängen von konstruktiven Größen des Schubstangengetriebes und der tatsächlichen Kraft der Fingerzylinder ab, weshalb diese Werte hier vorweg genommen werden.

Die Finger sind auf den Schlitten so angeordnet, dass die Außenseite eines Fingers einen Hebelarm zu der jeweiligen Drehachse bildet. Daher bewirkt die Greifkraft ein Moment um den Lagerpunkt. Die Kraft eines Fingerzylinders beträgt 68 N die Hebellänge 25 mm. Dadurch ergibt sich ein Moment von 1700 Nmm. Der Schwenkzylinder muss über das Schubstangengetriebe den Momenten beider Finger entgegenwirken, wobei in diesem Fall die Hebellänge ebenfalls 25 mm beträgt. Daher muss der Schwenkzylinder eine Kraft von mindestens 136 N beim Zurückziehen aufbringen.

5.4 Konzeption des Wirksystems

Der Greifer wird mit starren Fingern und starrem Daumen ausgerüstet, die senkrecht zum Handflansch des Roboters stehen. Die Länge der Greifglieder beträgt 90 mm. Die Greiffläche ist eben und steht senkrecht zur Zugriffsrichtung. Sie wird mit einem Elastomer beklebt, um den Haftreibungskoeffizient zu erhöhen und damit einen sicheren Griff zu gewährleisten.

Zum Fügen eines Dübels reicht die Reibkraft jedoch nicht aus. Daher werden an den Greifergliedern Absätze vorgesehen die 2 mm tief und 10 mm lang sind. Dadurch kann die Fügekraft über die Stirnseite des Dübels aufgebracht werden.

Finger und Daumen werden an den Schlitten der Lineareinheiten montiert, wobei darauf zu achten ist, dass die starren Greifglieder mit einfachen Handgriffen gegen die Finray-Finger ausgetauscht werden können.

5.5 Konzeption des Informationsverarbeitungssystems

Zum Überprüfen ob der Greifer ein Objekt gegriffen hat und zur Überprüfung der Konfiguration des Greifers werden Näherungsschalter eingesetzt, die eine Positionserkennung der Zylinderkolben ermöglichen.

Um detektieren zu können, ob ein Objekt gegriffen worden ist, wird an den Vorderseiten der Fingerzylinder je ein Schalter angebracht, der als Öffner ausgelegt ist. Dadurch ist der Stromkreis geschlossen, wenn ein Kolben nicht komplett ausgefahren ist, was bedeutet, dass ein Objekt gegriffen ist. Ist der Stromkreis offen, so ist entweder kein Objekt gegriffen oder es liegt ein Defekt in einer Zuleitung vor.

Zur Abfrage der Greiferkonfiguration ist an Schwenk- und am Daumenzylinder je ein Näherungsschalter angebracht. Die Schalter sind ebenfalls als Öffner ausgelegt und detektieren, ob sich der Daumen in der Mitte oder am Rand befindet und ob die Finger geschwenkt sind oder nicht.

Die Greifer-Steuerung muss einen Ethernet-Anschluss zur Kommunikation mit dem Zellenrechner, über vier digitale Ausgänge zur Ansteuerung der 5/2-Wege-Ventile und vier digitale Eingänge zur Abfrage der Näherungsschalter verfügen. Für die Stromversorgung der Steuerung stehen 24 V zur Verfügung.

5.6 Konzeption des Trägersystems

Das Trägersystem des Greifers besteht aus drei Ebenen, die parallel zum Handflansch des Roboters sind. Die erste Ebene wird von einer Flanschplatte gebildet, mit der der Greifer am Werkzeugwechselsystem befestigt wird. Die Flanschplatte ist mit einer Grundplatte verbunden, die die zweite Ebene bildet. Zwischen beiden Platten sind an der Unterseite der Grundplatte die Steuerung und die 5/2-Wege-Ventile montiert.

An der Oberseite der Grundplatte befindet sich vorne eine Brücke, auf der der Daumen mit Lineareinheit und Daumenzylinder befestigt ist. Weiter hinten ist an der Oberseite der Grundplatte ein Steg angebracht, auf dem sich der Schwenkzylinder und die beiden Drehachsen für die Lineareinheiten der Finger befinden. Der Abstand des Fingerstegs von der Daumenbrücke muss einstellbar sein, damit der Schwenkwinkel verändert werden kann. Fingersteg und Daumenbrücke bilden zusammen die dritte Ebene.

5.7 Auslegung und Auswahl der Komponenten

Die Lineareinheiten werden nach den Momenten ausgewählt, die von den Fingern bzw. dem Daumen auf die Schlitten ausgeübt werden. Die x-Achse verläuft in Richtung der Schiene, während die y-Achse nach unten aus der Schiene heraus zeigt. Der Daumenschlitten wird daher beim Drei-Finger-Parallelgriff von beiden Fingern mit einem Moment um die x-Achse M_{0x} belastet, während die Fingerschlitten mit je einem einfachen Moment um die y-Achse M_{0y} belastet werden, wie Abbildung 45 verdeutlicht. Die Belastung um die y-Achse tritt auf da, die Fingerschienen um 90° um die x-Achse gedreht eingebaut werden.

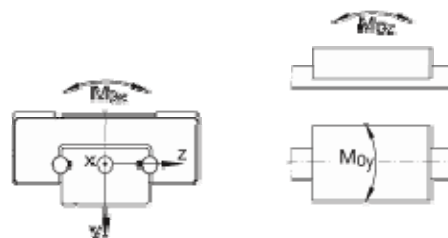


Abbildung 45: Koordinatensystem und Momente am Linearschlitten

Die Kraft der Fingerzylinder beträgt 68 N und die Länge der Greifglieder 90 mm. Daher muss der Daumenschlitten einem Moment von 12,24 Nm und ein Fingerschlitten einem Moment von 6,12 Nm widerstehen. Als Lineareinheiten werden Miniatur-

Umlaufeinheiten des Typs KUME 9 der Firma INA verwendet. Die Länge der Daumenschiene beträgt 80 mm, die Längen der Fingerschienen 120 mm.

Die Pneumatik-Komponenten werden von der Firma Festo zugekauft. Beim Daumenzylinder und den Fingerzylindern handelt es sich um doppeltwirkende Rundzylinder des Typs DSEU. Der Daumenzylinder besitzt einen Hub von 50 mm, einen Kolbendurchmesser von 8 mm und eine Kraft von 30 N bei Vor- und 23 N bei Rücklauf. Die Fingerzylinder besitzen einen Hub von 80 mm, einen Kolbendurchmesser von 12 mm und eine Kraft von 68 N bei Vor- und 51 N bei Rücklauf. Beim Schwenkzylinder handelt es sich um einen Kompaktzylinder vom Typ ADVU mit einem Hub und einem Kolbendurchmesser von je 25 mm und einer Kraft von 295 N bei Vor- und 247 N bei Rücklauf. Zur Positionserkennung werden Näherungsschalter vom Typ SMT eingesetzt, für die Befestigungs-Bausätze für die Rundzylinder mit eingekauft werden, während bei Kompaktzylindern ein Direkteinbau möglich ist.

Als Strombegrenzungsventil wird ein Drosselrückschlagventil des Typs GR eingesetzt, zur Ansteuerung der Zylinder werden Magnetventile vom Typ CPE10 verwendet. In jedes der Magnetventile werden zusätzlich zwei Schalldämpfer vom Typ UC eingeschraubt.

Als Greifersteuerung steht ein DK 40 Evaluation module der Firma Beck zur Verfügung. Es besitzt acht Klemmen, die wahlweise als digitaler Ein- oder Ausgang benutzt werden können, und ist in der Lage über Ethernet zu kommunizieren.

5.8 Konstruktion

Der Greifer ist so konstruiert, dass er einen möglichst geringen Bauraum benötigt. Alle selbst zu fertigenden Teile sind, wenn nicht anders erwähnt, aus Aluminium.

Die Flanschplatte ist über vier Verbindungsstege mit der Grundplatte verbunden, wobei die Stege so lang sind, dass zwischen den Platten genug Platz für die Greifersteuerung und die 5/2-Wege-Ventile ist. An einem der Stege ist das Strombegrenzungsventil montiert.

Die Daumenbrücke ist eine Platte, die ebenfalls mit Verbindungsstegen an der Grundplatte befestigt. Die Linearschiene, der Schlitten und der Daumen auf dem

Schlitten sind so angeordnet, dass sich der Daumen in jeder Konfiguration am vorderen Rand und beim Zwei-Finger-Griff auch am linken Rand des Greifers befindet, um das Greifen eines Objekts zu ermöglichen, das in einer Ecke liegt. Am linken Verbindungssteg der Brücke ist der Anschlag angebracht der den Hub des Daumenzylinders auf 45 mm begrenzt.

Der Fingersteg ist eine längliche Platte, die über einen L-förmigen Klotz mit der Grundplatte verbunden ist. An der Rückseite des Klotzes ist der Schwenkzylinder angebracht. Der kleine Schenkel des Klotzes ist mit zwei Klemmhebeln an der Grundplatte befestigt, wobei sich in der Grundplatte zwei Langlöcher befinden, die ein Verstellen des Fingerstegs in Richtung Daumen ermöglichen.

An der rechten und linken Seite des Fingerstegs sind die Drehachsen für die Finger angebracht. Auf jeder Achse ist ein Schwenkstück gelagert. Da es sich um eine Gleitlagerung handelt, sind die Drehachsen aus Messing. Beide Schwenkstücke besitzen je zwei Schenkel, die um 135° zueinander versetzt sind. Jeweils ein Schenkel ist über eine Schubstange mit dem Gabelkopf des Schwenkzylinders verbunden. Die Schubstangen sind aus Messing, da sie am Gabelkopf und an den Schenkeln gleitgelagert sind. Am Gabelkopf befindet sich eine Schraube, die in Richtung Zylinder verstellbar ist und als Anschlag zur Begrenzung des Schwenkwinkels dient.

Am jeweils anderen Schenkel des Schwenkstücks ist eine Linearschiene befestigt. Damit die Schienen an den Schwenkstücken verstellbar sind, befindet sich in dem jeweiligen Schenkel ein Langloch. Die Fingerzylinder sind unterhalb der Schienen und, um den Bauraum nach hinten klein zu halten, so weit vorne wie möglich an den Schienen angebracht. Damit die Kolbenstangen beim Drei-Finger-Parallelgriff im ausgefahrenen Zustand nicht miteinander kollidieren, ist der linke Fingerzylinder etwas weiter unterhalb der Schiene angebracht als der rechte. Die Kolbenstangen sind mit Aufsätzen für die Schlitten verbunden. In den Schlittenaufsätzen befinden sich je zwei Bohrungen, an denen die starren Finger direkt oder die Finray-Finger über Adapterstücke befestigt werden können.

Abbildung 46 auf der nächsten Seite zeigt links ein CAD-Modell mit starren Fingern beim Drei-Finger-Parallelgriff und rechts mit flexiblen Fingern beim Drei-Finger-Zentrischgriff.

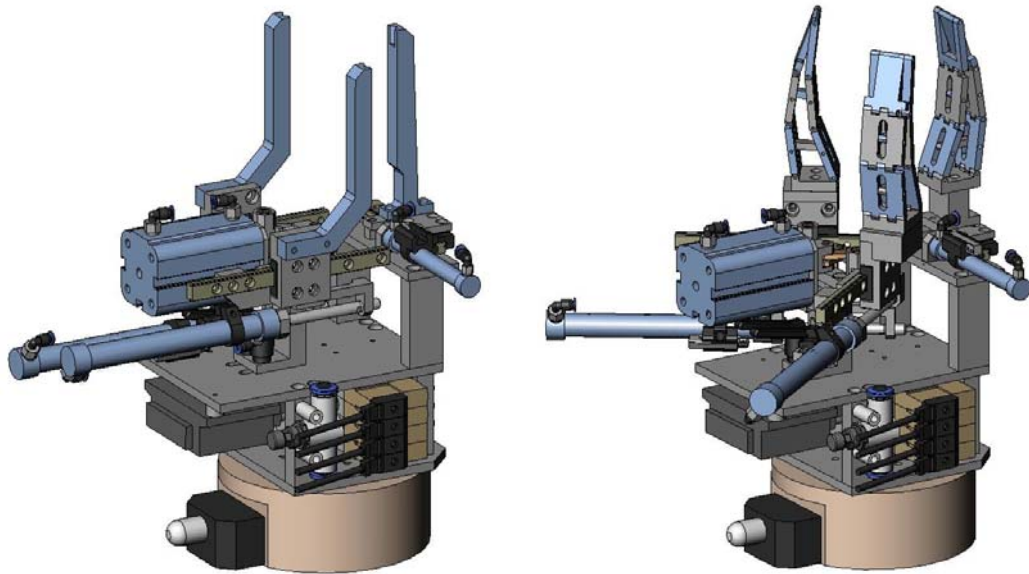


Abbildung 46: Greifer mit starren (links) und flexiblen Fingern (rechts)

In Abbildung 47 werden links der Zwei-Finger-Griff, in der Mitte der Drei-Finger-Parallelgriff und rechts der Drei-Finger-Zentrischgriff jeweils mit und ohne Greifobjekt gezeigt.

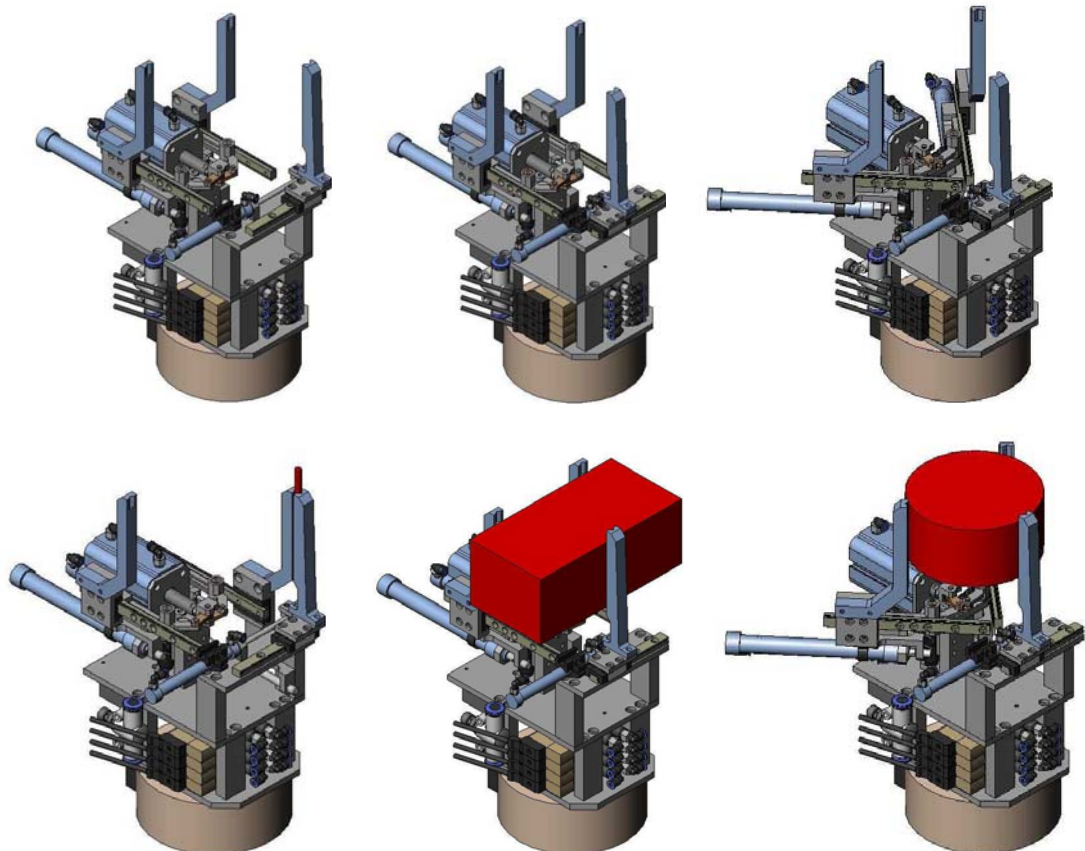


Abbildung 47: Vergleich der Greiferkonfigurationen mit und ohne Greifobjekt

6 ENTWURF UND DIMENSIONIERUNG EINER SAUGSPINNE ZUR HANDHABUNG FLÄCHIGER OBJEKTE

6.1 Anordnung der Saugnäpfe

Die Saugspinne verfügt über fünf Saugnäpfe, von denen vier in einem Rechteck mit den Abmessungen 300x500 mm angeordnet sind. Der fünfte Saugnapf befindet sich innerhalb des Rechtecks und ist im Abstand von 150 mm zu einer der kurzen Seiten und in Bezug auf die langen Seiten mittig angeordnet. Dadurch können Platten mit Abmessungen von 380x580 mm bis 600x800 mm mit allen fünf Saugnäpfen gegriffen werden, ohne dass nennenswerte Kippmomente auftreten. Kleinere Platten, bis hinunter zu Abmessungen von 230x380 mm, können mit drei Saugnäpfen gegriffen werden. Abbildung 48 zeigt dies in einer maßstäblichen Skizze.

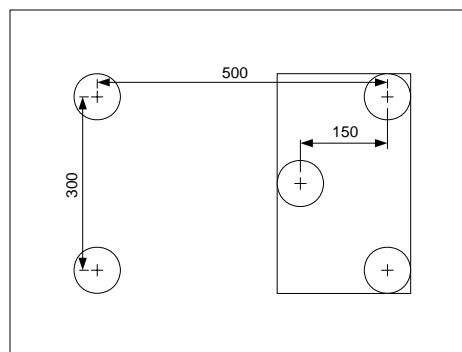


Abbildung 48: Anordnung der Saugnäpfe

6.2 Berechnung des Saugnapfdurchmessers

Die Kraft, die ein Saugnapf aufbringen muss, ist abhängig von der maximalen Masse einer Holzplatte m_{Pl} , der Beschleunigung beim Handhaben a , der Anzahl der Saugnäpfe n_S , dem Sicherheitsfaktor s_{Sa} und dem Haftreibungskoeffizient μ_H :

$$F_S = \frac{m_{Pl} * a * s_{Sa}}{n_S * \mu_H} = \frac{11 \text{ kg} * 12 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 2}{5 * 0,7} \approx 75,5 \text{ N}.$$

Die Formel aus Kapitel 2.5.2 zur Berechnung der Saugkraft wird nach dem wirksamen Saugnapfdurchmesser umgestellt:

$$F_S = \Delta p * D_w^2 * \frac{\Pi}{4} \Rightarrow D_w = \sqrt{\frac{4 * F_S}{\Pi * \Delta p}}.$$

Es wird ein 70%-iges Vakuum gefordert, was einer Druckdifferenz von $0,07 \text{ N/mm}^2$ entspricht:

$$D_w = \sqrt{\frac{4 * 75,5 \text{ N}}{\Pi * 0,07 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} \approx 37,06 \text{ mm}.$$

6.3 Auslegung und Auswahl der Komponenten

Die Komponenten der Saugspinne werden von der Firma Schmalz zugekauft. Das Trägersystem ist eine Traverse aus vakuumdichten Aluminium-Hohlprofilen. Die Profile haben die Außenmaße $40 \times 40 \text{ mm}$, eine innere Kammer mit den Maßen $20 \times 20 \text{ mm}$ und sind mit ein oder drei seitlichen Nuten versehen, die eine einfache Montage ermöglichen.

Die beiden Saugnäpfe je einer kurzen Seite des Rechtecks sind unterhalb eines 340 mm langen Profils befestigt. Diese beiden Seitenprofile sind wiederum über ein 540 mm langes Mittelprofil miteinander verbunden, wobei sich die Seitenprofile unterhalb des Mittelprofils befinden. Zur Montage werden Haltewinkel benutzt. Der fünfte Saugnapf befindet sich ebenfalls unterhalb des Mittelprofils. Die Kammern der Profile werden zusammengeschlossen, indem an den entsprechenden Stellen Löcher in die Ober- bzw. Unterseiten der Profile gebohrt werden. Zum Abdichten werden Ringnuten in die Unterseite des Mittelprofils gefräst, in die O-Ringe eingelegt werden. An den Stirnseiten der Profile befinden sich Dichtungen und Abschlussplatten.

Zum Einsatz kommen Saugnäpfe des Typs SAB 80 NBR 60. Sie haben einen Außendurchmesser von 80 mm , einen wirksamen Durchmesser von 40 mm und entwickeln eine hohe horizontale und vertikale Haltekraft. Das Innenvolumen eines Saugnapfs V_S beträgt $56,5 \text{ cm}^3$.

Als Vakuumerzeuger wird ein Kompaktejektor des Typs SMP 20 NC ASRD eingesetzt. Das maximale Vakuum beträgt 85% bei einem Betriebsdruck von 5-6 bar. Zusätzlich verfügt der Ejektor über eine Luftsparautomatik und eine digitale Vakuumüberwachung.

Das Volumen der Profilkammern $V_{K,ges}$ beträgt:

$$V_{K,ges} = l_{K,ges} * b_K * h_K = (2 * 340mm + 540mm) * 20mm * 20mm = 488000mm^3 = 0,488l .$$

Das Volumen aller fünf Saugnäpfe $V_{S,ges}$ beträgt:

$$V_{S,ges} = 5 * V_S = 5 * 56,5cm^3 = 0,2825l .$$

Daraus ergibt sich als gesamtes zu evakuierendes Volumen V_{ev} :

$$V_{ev} = V_{K,ges} + V_{S,ges} = 0,488l + 0,2825l \approx 0,78l .$$

Nach Herstellangaben beträgt die Evakuierungszeit t_{ev} für einen Liter bei einem 70%igen Vakuum 0,807 s. Die Evakuierungszeit für die Saugspinne $t_{ev,Sa}$ ist demnach:

$$t_{ev,Sa} = t_{ev} * V_{ev} = 0,807 \frac{s}{l} * 0,78l \approx 0,63s .$$

Zum An- und Abschalten einzelner Saugnäpfe werden Inlineventile verwendet, die direkt am Sauggreifer montiert werden können. Die Inlineventile sind mit Doppelnippeln an den Profilen befestigt. Wie bei der Spannvorrichtung kommt eine JetControl JC-241 als Steuerung zum Einsatz. An den Inlineventilen sind Vakuumschalter befestigt, die mit der Steuerung verbunden sind.

Werkzeugwechselsystem, Steuerung und Kompaktejektor werden am Mittelprofil befestigt. Das Werkzeugwechselsystem kann direkt montiert werden, die Steuerung wird auf eine Hutschiene geklemmt, die über Haltewinkel mit dem Mittelprofil verbunden ist. Der Ejektor wird auf eine selbst gefertigte Aluminiumplatte geschraubt, die am Mittelprofil befestigt ist. Abbildung 49 zeigt ein CAD-Modell der Saugspinne.

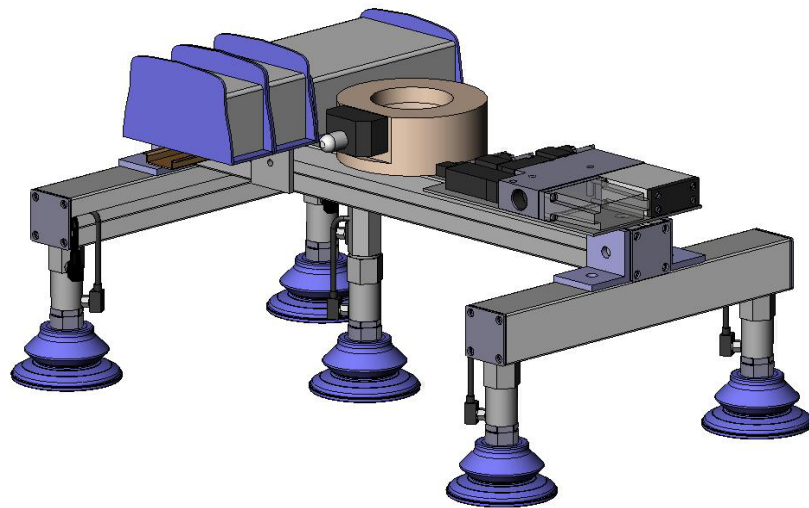


Abbildung 49: CAD-Modell der Saugspinne

7 INTEGRATION DER WERKZEUGE IN EINE ROBOTERZELLE

Es wird eine Roboterzelle aufgebaut, mit der die Fertigung eines Holzbauteils mit den entwickelten Werkzeugen demonstriert wird. Dazu wird mit der Saugspinne eine Leimholzplatte von einem Stapel gegriffen und an einem Bearbeitungsplatz festgespannt. Die Saugspinne wird gegen die Bohrvorrichtung ausgetauscht und in die Leimholzplatte werden Löcher gebohrt. Anschließend werden mit dem Greifer Dübel in die Bohrlöcher gefügt, die Platte gelöst und mit der Saugspinne auf einem anderen Stapel wieder abgelegt. Die Zelle wird vermutlich auf der Automatica 2006, der Leitmesse der Automatisierungsbranche, ausgestellt.

7.1 Definition der Teilsysteme und Auswahl der Komponenten

Die Roboterzelle besteht aus folgenden Teilsystemen:

- ♦ Roboter mit Steuerung
- ♦ Zellenrechner mit Rechnerarbeitsplatz
- ♦ Spannsystem
- ♦ Werkzeuge mit Werkzeugmagazin
- ♦ Werkstückmagazine
- ♦ Zellengerüst

Der Roboterhersteller Comau ist Teil des SMErobot-Konsortiums und stellt einen Sechs-Achs-Knickarmroboter des Typs Smart NS 16-1.65 mitsamt Robotersteuerung zur Verfügung. Der Roboter hat ein Handhabungsgewicht von 16 kg und bei voll ausgestrecktem Arm eine Reichweite von 1,65 m.

Als Zellenrechner wird ein PC eingesetzt, der zur Programmierung des Roboters und der Werkzeuge dient. Um auch während der Messe flexibel auf die

Fertigungsprogramme Einfluss nehmen zu können, wird ein Rechnerarbeitsplatz mit Bildschirm, Tastatur und Maus direkt in die Zelle integriert.

Als Spannsystem wird ein Vakuum-Aufspanntisch des Typs VC-T der Firma Schmalz eingesetzt (Abbildung 50). Kernstück des Systems ist eine Platte, auf der eine große Zahl an Saugstellen in einem Raster angeordnet sind. Alle Saugstellen werden über nur eine Leitung mit Vakuum versorgt und sind über spezielle Ventile geschlossen. Wird ein Blocksauger bei einem Vakuum von ca. 30 kPa auf die Platte gesetzt, öffnet sich automatisch ein Ventil, sodass der Blocksauger an der Platte festgesaugt wird. Ab einem Vakuumniveau von ca. 50 kPa öffnet sich ein Ventil im Blocksauger, sodass dieser auch das auf ihm liegende Werkstück mit ansaugt. Die Blöcke sind auf der Platte frei positionierbar, was eine sehr hohe Flexibilität bezüglich der Werkstückposition bietet.

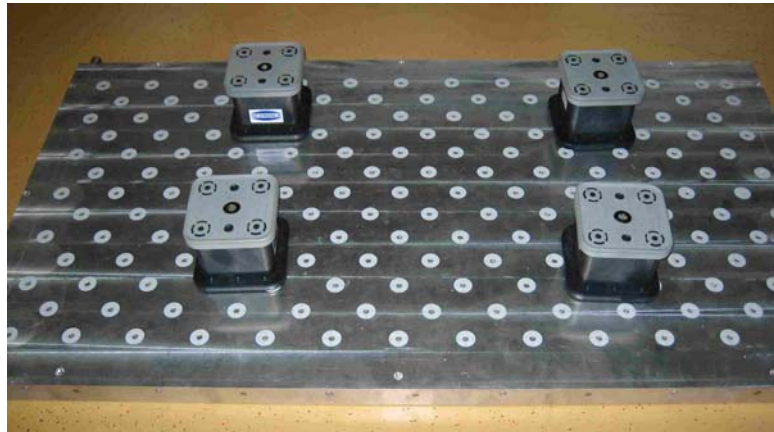


Abbildung 50: Vakuum-Aufspanntisch mit Blocksaugern

Zur Vakuumerzeugung steht eine Vakuum-Zentrale VZ 165 OG/200 der Firma Schmalz zur Verfügung. Die Vakuum-Zentrale besteht aus Vakuumpumpe, Vakuumspeicher, Sicherheitsrückschlagventil und interner Regelung. Damit baut die Pumpe im Speicher das eingestellte Vakuum auf, dann wird sie über den integrierten Vakuumschalter solange abgestellt, bis das Vakuum unter den eingestellten Mindestwert absinkt.

Die Entwicklung der Magazine für die unbearbeiteten und bearbeiteten Werkstücke und des Werkzeugmagazins ist nicht Teil der Aufgabenstellung. Daher werden für die Magazine zunächst Platzhalter verwendet.

7.2 Layoutplanung

Das Zellengerüst wird aus 90x90 mm Bosch-Profilen aufgebaut. Die Grundfläche der Zelle beträgt 2,3x2,3 m bei einer Höhe von 2,4 m. Das Innenmaß der Ladefläche eines Lkw's beträgt 2,4 m in der Breite. Damit ist gewährleistet, dass die Roboterzelle in einem Stück transportiert werden kann.

Abbildung 51 zeigt die Anordnung der Teilsysteme innerhalb der Roboterzelle. Der Roboter ist zentral in der Mitte der Zelle auf einem 400 mm hohen Sockel angeordnet. Aufspanntisch, Werkstückmagazine, Werkzeugmagazin und Rechnerarbeitsplatz befinden sich auf einem 900 mm hohen Zellentisch. Der Aufspanntisch mit den Blocksaugern ist mittig vor dem Roboter platziert. Links des Aufspanntisches befindet sich das Magazin mit den unbearbeiteten, rechts das Magazin mit den bearbeiteten Leimholzplatten. Links neben dem Roboter sind die Robotersteuerung und der Rechnerarbeitsplatz zu sehen. Beide sind so angeordnet, dass sie von außerhalb der Zelle bedient werden können. Auf der rechten Seite des Roboters befindet sich das Werkzeugmagazin. Anstelle der Werkzeuge sind türkise Quader als Platzhalter dargestellt. Der Zellenrechner befindet sich unterhalb des Rechnerarbeitsplatzes. Der blaue Quader dient als Platzhalter für die Vakuumpumpe, die unterhalb des Aufspanntisches angeordnet ist.

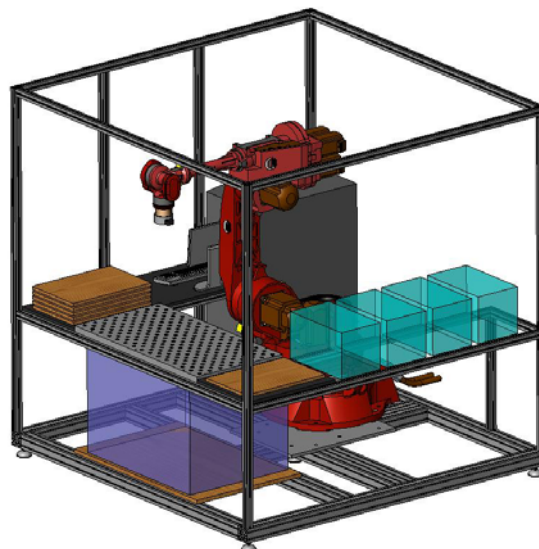


Abbildung 51: Anordnung der Teilsysteme innerhalb der Roboterzelle

7.3 Überprüfung der Reichweite und Kollisionsbetrachtung

Um sicherzustellen, dass die Werkstückmagazine, das Werkzeugmagazin und der Bearbeitungsbereich vom Roboter erreicht werden können, wird anhand des Roboterdatenblattes dessen Arbeitsraum im CAD nachgebildet. Der Arbeitsraum ist fast kugelförmig und in Abbildung 52 als transparenter, grüner Körper dargestellt.

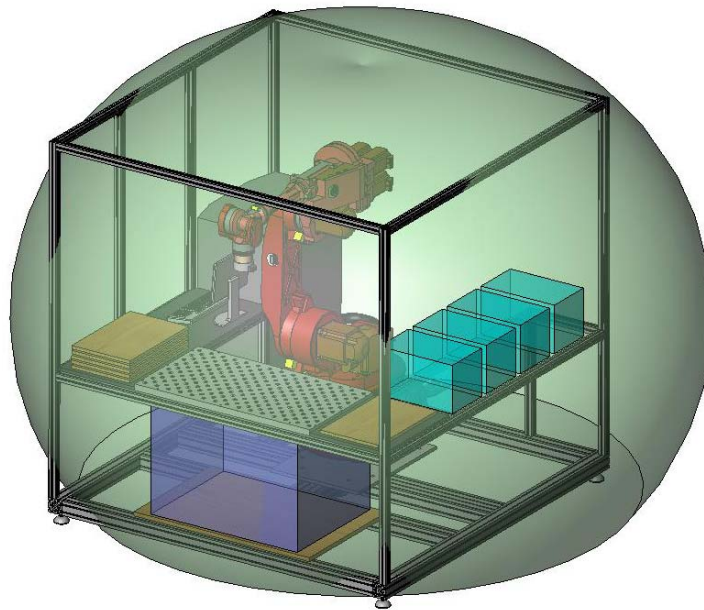


Abbildung 52: Zelle mit Arbeitsraum des Roboters

Es ist zu erkennen, dass der Arbeitsraum den gesamten hinteren Teil der Roboterzelle, mit Ausnahme der oberen Ecken, einschließt. Im vorderen Bereich liegen die unteren und oberen Ecken und die obere Kante der Zelle außerhalb der Kugel. Auf Höhe des Zellentisches ragt der Arbeitsraum jedoch zu allen Seiten um mindestens 250 mm über die Zelle hinaus, sodass die Erreichbarkeit aller relevanten Bereiche sichergestellt ist.

Zusätzlich wird in der CAD-Umgebung überprüft ob der Roboter während der Bewegung zwischen den Stationen mit anderen Teilen der Roboterzelle kollidiert, was hauptsächlich das auf eine Kollision der Rückseite des zweiten Armgliedes mit der Robotersteuerung bezieht. Dazu wird der Handflansch in Abständen von 100, 300, 500 und 700 mm über der Arbeitsebene jeweils 600 und 1200 mm entfernt von der ersten Achse positioniert, wodurch sich acht Posen ergeben, die den relevanten Arbeitsbereich des Roboters abdecken. In jeder der acht Posen wird der Roboter um die erste Achse gedreht, wobei festzustellen ist, dass es zu keinem Zeitpunkt zu einer Kollision innerhalb der Roboterzelle kommt.

8 ERPROBUNG DES BOHRWERKZEUGS

Von den entwickelten Werkzeugen ist lediglich das Bohrwerkzeug rechtzeitig fertig gestellt, um damit Versuche durchführen zu können. Im Hinblick auf geringe Zykluszeiten soll dabei ermittelt werden, mit welchen Vorschüben das Bohren möglich ist. Beurteilt werden die Qualität der Bohrlöcher und das Verhalten des Bohrwerkzeugs während der Versuche.

8.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand besteht aus einem Roboter vor dem sich, wie in der Roboterzelle, der Vakuumaufspanntisch befindet. Da jedoch zur Zeit der Versuchsdurchführung der für die Roboterzelle vorgesehene Roboter noch nicht geliefert ist, wird ein RX130 der Firma Stäubli für die Versuche eingesetzt. Auch das Werkzeugwechselsystem und der Kraft-Moment-Sensor stehen nicht zur Verfügung, weswegen das Bohrwerkzeug direkt an den Handflansch montiert wird. Ebenso müssen Pneumatik und Elektrik direkt an den Roboter angeschlossen werden, wie in Abbildung 53 zu sehen ist.



Abbildung 53: Versuchsstand mit Roboter, Bohrwerkzeug und Aufspanntisch

8.2 Versuchsdurchführung

Das Ziel der Versuche ist den maximalen Vorschub in Abhängigkeit von Drehzahl, Holzart, Bohrertyp und –durchmesser herauszufinden. Die maximale Drehzahl des Bohrwerkzeugs beträgt ca. 1400 U/min.

Verwendet werden Leimholzplatten aus Fichte, Kiefer und Buche mit den Abmessungen 800x400x18 mm, wobei Fichte ein weiches, Kiefer ein mittelhartes und Buche ein hartes Holz darstellt.



Abbildung 54: Spiralholzbohrer, Astlochbohrer, Lochsäge und Scharnierfräse

Abbildung 54 zeigt die verschiedenen Bohrertypen, mit denen die Versuche durchgeführt werden. Dies sind (v.l.n.r.):

- ♦ Spiralholzbohrer in den Durchmessern 3, 6 und 10 mm
- ♦ Astlochbohrer in den Durchmessern 10, 15 und 20 mm
- ♦ Lochsägen in den Durchmessern 22, 54 und 67 mm
- ♦ und eine Scharnierfräse mit einem Durchmesser von 35 mm.

Mit Spiralbohrern, Astlochbohrern und Lochsägen wird die Platte grundsätzlich durchbohrt, während mit der Scharnierfräse auch Bohrungen bis zu einer bestimmten Tiefe gemacht werden.

Zunächst wird mit einem 3 mm Spiralbohrer bei geringem Vorschub und geringer Drehzahl in Fichtenholz gebohrt. Daraufhin werden Vorschub und Drehzahl schrittweise erhöht, wobei die Schwingung des Werkzeugs, die Änderung der Drehzahl beim Eindringen des Bohrers ins Holz und die Wärmeentwicklung beobachtet werden. Anschließend werden die Versuche erst mit größeren Durchmessern und dann mit

andern Bohrerarten wiederholt. Eine Versuchsreihe wird abgebrochen, wenn einer der oben genannten Parameter als kritisch erachtet wird oder der Vorschub einen Wert von 20 mm/s erreicht, da eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit kaum zu einer Verkürzung der Zykluszeit führt. Anschließend werden die Versuchsreihen auch mit Kiefern- und Buchenholz gemacht. Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Versuche. n_B steht für Drehzahl (in U/min) und v_B für Vorschub (in mm/s), die Tiefe der Scharnierlöcher ist in mm angegeben.

Tabelle 8: durchgeführte Bohrversuche

		Fichte								Kiefer								Buche				
Spiralbohrer	n_B/v_B	2	4	6	8	10	12	15	20	2	4	6	8	10	12	15	20	2	4	6	8	10
Ø 3mm	300	x																				
	500	x	x	x						x	x							x				
	700	x	x	x						x	x	x						x	x			
	900	x	x	x	x					x	x	x	x	x				x	x	x	x	
	1400			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	n_B/v_B	2	4	6	8	10	12	15		2	4	6	8	10	12	15	20	2	4	6	8	10
Ø 6mm	500									x												
	700	x	x							x	x	x						x				
	900	x	x	x	x	x				x	x	x	x					x	x	x	x	
	1400	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	n_B/v_B	2	4	6	8	10	12	15		2	4	6	8	10	12	15	20	2	4	6	8	10
Ø 10mm	700	x								x												
	900	x	x	x	x	x				x	x	x						x	x	x	x	
	1400	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	n_B/v_B	2	4	6	8	10	12	15		2	4	6	8	10	12	15	20	2	4	6	8	10
Astlochbohrer	n_B/v_B	2	4	6	8	10				2	4	6	8					2	4	6		
Ø 10mm	1000	x																				
	1400	x	x	x	x	x				x	x	x	x					x	x	x		
Ø 15mm	1400	x	x	x						x	x	x	x					x	x	x		
Ø 20mm	1400	x								x								x	x			
	n_B/v_B	1	2	4						1								1				
Lochsäge	Ø 22mm	1000	x																			
		1400	x	x	x					x								x				
	Ø 54mm	1400	x	x	x					x								x				
	Ø 67mm	1400	x	x	x					x								x				
	n_B/v_B	1	2	4						1								1				
Scharnierfräse	Tiefe	5	10	15	18					5	10	15	18					5	10	15	18	
	$n_B=1400$ $v_B=1$	x	x	x	x					x	x	x	x					x	x	x	x	

8.3 Versuchsergebnisse

Der Bohrprozess ist mit Spiralbohrern und der Scharnierfräse gleichmäßig, während bei Versuchen mit den Astlochbohrern und den Lochsägen teilweise starke Schwingungen des Werkzeugs auftreten. Beim Bohren mit einem 20-mm-Astlochbohrer in Kiefernholz führt dies sogar zum Losdrehen einer Schraube der Bohrvorrichtung.

Das Absinken der Drehzahl, in der Phase, in der der Bohrer auf das Holz trifft, ist bei niedrigen Drehzahlen und größeren Bohrerdurchmessern und Vorschüben sehr deutlich, wobei der Einfluss der Drehzahl gegenüber dem des Vorschubs überwiegt. Daher werden mit Astlochbohrern, Lochsägen und der Scharnierfräse bis auf zwei Ausnahmen nur Bohrungen mit einer Drehzahl von 1400 U/min und geringeren Vorschüben gemacht. Mit der 67-mm-Lochsäge müssen eine Bohrung in Fichte bei 4 mm/s und in Buche bei 1 mm/s abgebrochen werden, da der Widerstand beim Bohren zum Stillstand der Lochsäge führt. Abbildung 55 zeigt die abgebrochene Bohrung in die Fichtenholzplatte.



Abbildung 55: Bohrung mit Lochsäge nach Versuchsabbruch

Die Qualität der gebohrten Löcher unterscheidet sich sehr stark voneinander. In Abbildung 56 ist links die Ober- und rechts die Unterseite der Fichtenholzplatte mit Bohrlöchern der Spiralbohrer zu sehen, wobei die Astlochbohrer und Lochsägen ähnliche Ergebnisse liefern.



Abbildung 56: ausgerissenes Material bei Fichtenholz, Oberseite links, Unterseite rechts

Es deutlich zu erkennen, dass das Holz zum Ausreißen neigt, wobei an den Kanten der Oberseite einige Fasern und an den Kanten der Unterseite ganze Holzsplitter stehen bleiben, deren Größe mit steigendem Bohrerdurchmesser zunimmt. Vorschub und Drehzahl haben auf die Qualität jedoch keinen erkennbaren Einfluss. Die gleichen Probleme treten beim Bohren in Kiefern- und Buchenholz auf, die Menge der ausgerissenen Fasern und Splitter und deren Größe werden jedoch mit steigender Härte des Holzes geringer, wie Abbildung 57 für Kiefer und Abbildung 58 für Buche zeigt.



Abbildung 57: ausgerissenes Material bei Kiefernholz



Abbildung 58: ausgerissenes Material bei Buchenholz

Die Bohrkanten, die mit der Scharnierfräse entstehen, sind an der Oberseite und innerhalb des Holzes sehr glatt, wenn die Bohrung nicht durchgehend ist. Wird jedoch durchgebohrt, reißt auch hier das Material an der Unterseite aus. Abbildung 59 zeigt links ein gesenktes, in der Mitte ein durchgebohrtes Loch von oben und rechts ein durchgebohrtes Loch von unten.



Abbildung 59: mit Scharnierfräse gebohrte Löcher

8.4 Folgerungen

Das robotergeführte Bohren ist mit dem entwickelten Bohrwerkzeug mit allen Bohrerarten und in alle drei Holzarten möglich. Bei größeren Durchmessern muss teilweise mit sehr geringem Vorschub gebohrt werden, was zu relativ hohen Bearbeitungszeiten führt. Gleichzeitig sind die Kanten der Bohrlöcher besonders bei weichem Holz sehr unsauber und können eventuell sogar den nachfolgenden Fügeprozess behindern.

Da in der industriellen Holzbearbeitung Spindeln mit über 20.000 U/min und 500 mm/s (= 30 m/min) betrieben werden, sind beide Effekte auf die relativ geringe Drehzahl des Bohrschraubers zurückzuführen. Im nächsten Entwicklungsschritt sollte daher ein Handwerkzeug eingesetzt werden, dessen Drehzahl wesentlich höher liegt, wie beispielsweise eine Oberfräse die bis zu 15.000 U/min erreicht. Diese Geräte werden jedoch mit 230 V Wechselstrom betrieben, sodass zusätzlich das Problem der Kabelführung gelöst werden muss.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden drei Werkzeuge für die Holzbearbeitung entwickelt, die von einem Roboter geführt und, im Sinne des plug-and-play-Gedankens, schnell und flexibel gegeneinander ausgetauscht werden können, um eine automatisierte Fertigung von Holzbauteilen in kleinen Losgrößen zu ermöglichen. Die mechanische Verbindung zum Roboter wird über ein Werkzeugwechselsystem hergestellt, während zur steuerungstechnischen Integration jedes der Werkzeuge eine eigene dezentrale Steuerung mit Kommunikations-Schnittstelle besitzt.

Beim ersten Werkzeugsystem handelt es sich um ein Bohrwerkzeug bestehend aus einer Spannvorrichtung, in die ein handelsüblicher Akkuboehrschrauber eingespannt wird. Die Drehzahl des Bohrschraubers wird von der Werkzeugsteuerung geregelt. Zum Drücken des Betätigungsknopfes wird ein Pneumatikzylinder eingesetzt, die Ist-Drehzahl wird mit einem Tachogenerator gemessen.

Das zweite Werkzeug ist ein flexibler Fingergreifer auf Pneumatikbasis zur Handhabung kleiner und mittlerer Teile variabler Geometrie, mit dem auch das Fügen eines Holzdübels in ein Bohrloch möglich ist. Der Greifer ist konfigurierbar, sodass zwischen Drei-Finger-Zentrischgriff, Drei-Finger-Parallelgriff und Zwei-Finger-Griff gewechselt werden kann, um ein möglichst großes Teilespektrum abdecken zu können.

Das dritte Werkzeug ist eine Saugspinne zur Handhabung von Holzplatten. Sie verfügt über fünf Saugnäpfe, die von einem Ejektor mit Vakuum versorgt werden. Über Inlineventile können die Saugnäpfe bei Bedarf einzeln abgeschaltet werden.

Daraufhin wurden das Layout für eine Roboterzelle entworfen und die drei Werkzeuge in diese integriert. Die Zelle soll die Möglichkeiten der plug-and-play-Technologie hinsichtlich flexibler Fertigung von kleinen Losgrößen in Form eines Montagevorgangs demonstrieren und wird voraussichtlich auf der Automatica 2006 ausgestellt.

Abschließend wurde das Bohrwerkzeug aufgebaut und getestet, wobei es seine grundlegende Funktionsfähigkeit bewiesen hat. Aufgrund der geringen Drehzahl des

Akkuboehrschraubers entsprach die Qualität der gebohrten Löcher dabei jedoch nicht vollständig dem gewünschten Ergebnis.

Als Nächstes ist daher die Weiterentwicklung der Vorrichtung unter Verwendung eines anderen Handwerkzeugs, das mit einer höheren Drehzahl betrieben wird, denkbar. Zusätzlich müssen der Kraft-Moment-Sensor angebaut und die, aus dem Bohrprozess resultierenden, Kräfte und Momente in die Programmierung des Bohrwerkzeugs einbezogen werden.

Sowohl der flexible Greifer als auch die Saugspinne existieren bisher nur als CAD-Modell und haben in der Realität ihre Funktionsfähigkeit noch nicht unter Beweis gestellt. Beide müssen zunächst gefertigt, aufgebaut und programmiert werden.

Danach werden Greifversuche erst mit den starren und dann mit den flexiblen Fingern gemacht, um zu ermitteln, welche Greifobjekte in welcher Konfiguration gegriffen werden können und wie hoch die Sicherheit beim Greifen ist. Anschließend ist zu testen, ob das Fügen eines Dübels mit den starren Fingern möglich ist.

In Versuchen mit der Saugspinne wird die Handhabung von Holzplatten getestet. Es ist herauszufinden ob die berechnete Saugleistung und der Saugnapfdurchmesser ausreichen um die Platten sicher halten und Handhaben zu können.

Für die Roboterzelle müssen als Erstes ein Werkzeugmagazin und zwei Werkstückmagazine entwickelt werden. Sobald der neue Roboter geliefert wird, kann mit dem Aufbau der Zelle begonnen werden. Im Anschluss daran ist die Zelle so zu programmieren, dass sie ihre plug-and-play-Fähigkeit anhand des Szenarios „Montage eines Holzdübels“ demonstrieren kann.

QUELLENVERZEICHNIS

- [ABB05] N.N., Internetseite der Firma ABB:
[http://www.abb.de/GLOBAL/seapr/SEAPR035.NSF/viewunid/2B5AD121D989297EC1256B430045A8AA/\\$file/840.jpg](http://www.abb.de/GLOBAL/seapr/SEAPR035.NSF/viewunid/2B5AD121D989297EC1256B430045A8AA/$file/840.jpg), 28.12.2005.
- [Bau02] Bauer, Frank: Maßnahmen und Methoden zur Flexibilisierung pneumatischer Greifsysteme. Dissertation, Universität Dortmund, 2002.
- [Bec93] Becker, Ralf: Untersuchungen zum Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifern. Dissertation, Universität Dortmund, 1993.
- [But99] Butterfass, J.: Eine hochintelligente multisensorielle Vier-Finger-Hand für Anwendungen in der Servicerobotik. Berichte aus der Robotik. Shaker-Verlag, Aachen, 2000.
- [Hes00] Hesselbach, J.: Maschinensysteme für die Holzbearbeitung von morgen. 11. Braunschweiger holztechnisches Kolloquium: Innovationen für die Holzbearbeitung von morgen. Vulkan-Verlag, Essen, 2000.
- [Hör98] Hörzer, Thomas: Flexibel automatisierte Montage von Holzdübeln mit Industrierobotern. Dissertation, Universität Stuttgart, 1998.
- [INT1] N.N., Internetseite: http://www.t-s-m.org/AUTOMATION/BILDER_DAL_MASCHIO/ROBOT_1_K.jpg, 28.12.2005.
- [INT2] N.N., Internetseite: <http://images.automationworld.com/issues/07.04/images/Products/bosch.jpg>, 28.12.2005.
- [INT3] N.N., Internetseite:
<http://www.mhp-france.com/images/symetrieHexapode.JPG>,
28.12.2005.
- [INT4] N.N., Internetseite: <http://www.eng.uc.edu/~elhall/tricep1.jpg>,
28.12.2005.

-
- [Kre03] Kreis, Willibald: Automatisierungs- und Robotertechnik. Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Fakultät Maschinenbau der Universität Dortmund, 2003.
- [Lot02] Lotti, F., Vassura, G.: Design aspects for advanced Robots Hands: Mechanical design. In: Tagungsband "Towards Intelligent Robotic Manipulation", IROS 2002.
- [Sal83] Salisbury, K. S.; Roth, B.: Kinematics and force analysis of articulated mechanical hands. Journal of Mechanism, Transmission and Automation in Design 105 (1983), pp.35-41.
- [SBS05] N.N., Internetseite des Sächsischen Bildungsservers: Grundlagen der Robotertechnik:
<http://marvin.sn.schule.de/~gyfloeha/rt/lex01/pics/freiheitsgrade03.gif>,
28.12.2005.
- [SEF05] N.N., Internetseite der Firma SEF:
<http://cgi.sef-roboter.de/content/prod/rob/sr60/images/sr60.jpg>,
28.12.2005.
- [SME05] N.N.: SMErobot: Eine neue Robotergeneration für den Mittelstand. Pressemitteilung zum Projekt SMErobot, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, 2005.
- [Sch04] Schraft, R. D.; Wegener, K.: Greifen geometrievarianter Objekte, VDI-Berichte 1841, 2004.
- [See93] Seegräber, Ludwig: Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter. Expert-Verlag, 1993.
- [VDI90] N.N.: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. VDI-Richtlinie 2860, VDI-Verlag Düsseldorf, 1990.
- [VDI95] N.N.: Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter. VDI-Richtlinie 2740, VDI-Verlag Düsseldorf, 1995.
- [Weg05] Wegener, K.: Flexibles Greifen von Bauteilen, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95 (2005), Heft 3.

-
- [Wol04] Wolf, A.; Steinmann, R.: Greifer in Bewegung – Faszination der Automatisierung von Handhabungsaufgaben. Hanser-Verlag, München 2004.

ABSCHLUSSERKLÄRUNG

Die vorgelegte Arbeit wurde vom Sechsten Rahmenprogramm der Europäischen Union als Teil des Forschungsprojektes SMErobot gefördert.

Hiermit versichere ich, dass die vorgelegte Arbeit von mir und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, dass ich alle Abbildungen bzw. alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen sind, kenntlich gemacht habe.