

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik

## **Anwendungsspezifische Kinematikentwicklung unter Einsatz modularer Prototypen**

**Marcus Fischer**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

### **Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Univ.-Prof. Kristina Shea, Ph.D.

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 07.07.2010 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen  
am 18.10.2010 angenommen.

Die vorliegende Arbeit wurde auch in der Schriftenreihe  
FORTSCHRITT-BERICHTE VDI veröffentlicht:

Fischer, M.: Anwendungsspezifische Kinematikentwicklung unter Einsatz modularer  
Prototypen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 432. Düsseldorf: VDI-Verlag 2011. ISBN:  
978-3-18-343220-2.

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit über die durchgängige Entwicklung anwendungsspezifischer Roboter unter Verwendung eines modularen Kinematik-Baukastens entstand während meiner Tätigkeit im Team von Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth an der Technischen Universität München.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth (Ordinarius des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik an der Technischen Universität München). Ihm danke ich sehr herzlich für die fachliche Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit und die Möglichkeit, diese an einem hervorragend ausgestatteten Forschungsinstitut durchführen zu können.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart (Ordinarius am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften an der Technischen Universität München) danke ich an dieser Stelle ausdrücklich für die Übernahme des Koreferats.

Frau Prof. Kristina Shea, Ph.D. (Extraordinaria am Lehrstuhl für Produktentwicklung an der Technischen Universität München) danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes meiner mündlichen Prüfung.

Weiterhin geht mein Dank an meine ehemaligen Kollegen für deren Unterstützung, für unzählige fachliche und nicht fachliche Diskussionen und für die angenehme und freundschaftliche Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank gilt Dr. Stephan Nowatschin für die Durchsicht und Kontrolle der Arbeit. Insbesondere danke ich auch Dr. Franz Irlinger und Christian Richter für viele ergiebige Diskussionen und Anregungen. Ferner danke ich Tobias Kraus, Maximilian Krinninger, Mathias Markert, Thomas Ottnad, Dr. Michael Scheuenpflug, Dr. Sebastian Stopp, Markus Vogl sowie den Mitarbeitern der Werkstatt für ihre stete Hilfsbereitschaft. Ebenso danke ich den Studenten Xingchi He, Ahmad Mecsaci, Richard Popp, Cornelia Pfister, Christoph Vodermaier und Philine Donner für ihre engagierte Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Familie, insbesondere an meine Eltern und Großeltern, für die Ermöglichung einer sehr guten Ausbildung sowie für den ständigen Rückhalt und die Unterstützung. Ein Teil des Erfolges dieser Arbeit ist sicherlich auch ihnen geschuldet. Genauso gilt mein Dank meiner Freundin Regina für ihre Geduld mit mir und meiner Arbeit. Allen Menschen, die mich auf meinem Weg bis hierhin begleitet haben und so ihren Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, gilt mein Dank.

Marcus Fischer, Oktober 2010

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Zielsetzung der Arbeit .....	6
<b>2. Stand der Technik.....</b>	<b>8</b>
2.1 Methoden der Mechanismen- und Roboterentwicklung .....	8
2.2 Baukastensysteme zur Roboterentwicklung.....	20
2.3 Darstellung des Entwicklungsergebnisses .....	22
2.4 Marktverfügbare Verfahren der generativen Fertigung.....	25
2.5 Rapid Prototyping in der Kinematikentwicklung.....	32
2.6 Rapid Control Prototyping .....	35
2.7 Defizite am Stand der Technik .....	36
<b>3. Anwendungsspezifische Kinematikentwicklung unter Einsatz modularer     Prototypen .....</b>	<b>41</b>
3.1 Eigener Ansatz.....	41
3.2 Abgrenzung.....	44
<b>4. Gesamtkonzept des Systems zur Kinematikentwicklung unter Einsatz     modularer Prototypen.....</b>	<b>46</b>
4.1 Ablauf der Kinematikentwicklung.....	46
4.2 Statische Beschreibung verwendeter Teilelemente.....	50
4.3 Informationsflüsse während der Kinematikentwicklung .....	72
<b>5. Ausgestaltung des Kinematikbaukastens .....</b>	<b>74</b>
5.1 Verwendete Baukastenelemente.....	74
5.2 Ausprägungen des Mechanismenbaukastens.....	75
5.3 Eigenschaften der verwendeten Elemente.....	78

---

<b>6.</b>	<b>Realisierung ausgewählter Systemkomponenten sowie der Prototypenausgabe.....</b>	<b>104</b>
6.1	Realisierung der Kinematikentwicklung .....	104
6.2	Ergebnisaufbereitung und Prototypenausgabe mittels Rapid Prototyping	113
6.3	Aktuierung der Prototypen.....	125
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>130</b>
<b>8.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>134</b>

# 1. Einleitung

Zur Realisierung technischer Aufgabenstellungen werden häufig Kinematiken in Form von Mechanismen (gr. *mechané*, Maschine, Werkzeug) oder Robotern, Systemen mit mindestens drei unabhängigen aktuierten Freiheitsgraden (EN, 1996), eingesetzt. Mechanismen sind dabei oft in alltäglichen Geräten und Gebrauchsgegenständen zu finden. Robotersysteme hingegen werden überwiegend in der Industrie, der Medizin sowie der Forschung eingesetzt.

Bekannte Beispiele für Mechanismen aus dem privaten Bereich sind in der Mechanik zur Bewegung von Schranktüren, Heckklappen von PKW oder aber auch in Garagentoren anzutreffen. Industriell werden sie unter anderem zum Materialtransport in Pressenstraßen oder auch in Manipulatoren zum Materialhandling eingesetzt. Robotersysteme werden großteils industriell, beispielsweise in flexiblen Fertigungsstraßen sowohl für Transport- als auch für Montageaufgaben, eingesetzt. Weiterhin finden sie im Bereich der Manipulatoren in der Medizintechnik Anwendung. Dort ermöglichen diese Systeme zum Beispiel telemanipulierte, manuell getriggerte und geführte Bewegungen eines chirurgischen Instruments. Durch den verschiedenartigen mechanischen Aufbau sowie die individuell angesteuerte Aktorik kann mittels Mechanismen und Robotern eine Vielzahl von Aufgaben realisiert werden.

Dabei werden mittels Mechanismen zumeist mit hoher Frequenz wiederkehrende, ebene Bewegungen verrichtet. Die hierzu verwendeten Gelenkgetriebe oder Kurvenscheiben sind dann als geschlossene kinematische Ketten ausgebildet und besitzen nur einen Freiheitsgrad. Aufgrund ihres Zwangslaufs können sie von einem einzigen Motor angetrieben werden. Hierdurch entfällt die Notwendigkeit von Synchronisierungen. Zudem können mit den Systemen hohe Umlaufgeschwindigkeiten erzielt werden. Der gleichmäßige Betrieb des dann ebenfalls meist umlaufenden rotatorischen Antriebs unterstützt eine Minimierung der Verlustleistungen. Durch die Einschränkung der Anzahl der Freiheitsgrade sind Mechanismen allerdings nur sehr aufgabenbezogen einzusetzen. Geänderte Anforderungen erfordern daher die Entwicklung eines neuen Mechanismus.

Die industriell eingesetzten Robotersysteme sind zumeist in Form von offenen, seriellen kinematischen Ketten aufgebaut (vgl. Standard-Sechssachsroboter). Die hohe Anzahl unabhängiger Freiheitsgrade ermöglicht ihren Einsatz im Bereich komplexer räumlicher Bewegungsaufgaben. Durch die meist redundanten Achsen können dabei nicht nur gewünschte Positionen, sondern auch Orientierungen realisiert werden. Sollen neue Aufgabenstellungen bearbeitet werden, können Standardroboter an diese, innerhalb ihres Arbeitsraumes, durch Änderung der Ansteuerung flexibel angepasst werden. Hiermit kann jedoch nicht das Optimum an Effizienz in Bezug auf Bearbeitungszeit und Betriebskosten erreicht werden. Speziell bei Aufgabenstellungen mit besonderen Anforderungen, welche von Standardanwendungen abweichen, ist die Entwicklung angepasster Robotersysteme notwendig. Beispiele hierzu sind häufig bei der Betrachtung der spezialisierten Systeme der Medizin, der Forschung, etc.

zu finden. Bei deren Entwicklung müssen individuelle Randbedingungen wie der verfügbare Bau- und Arbeitsraum, das maximal zulässige Gewicht des Systems oder Ähnliches berücksichtigt werden. Diese gehen dann in die Auslegung der Kinematik hinsichtlich der gewünschten Bewegungsbahn sowie in die Implementierung der Robotersteuerung mit ein. Weitere Herausforderungen bei der Entwicklung sind die Synchronisation der Antriebe sowie die Vermeidung von Singularitäten.

Aufgrund der vielfältigen Einflüsse stellt die Entwicklung von Kinematiken für Mechanismen und Roboter eine komplexe und durch den domänenübergreifenden Charakter aufwendige, mechatronische Aufgabenstellung dar. Die einzelnen Teilaufgaben wie die Entwicklung der Mechanik des Systems, dessen Aktorik sowie der Ansteuerung werden meist einzeln am Rechner durchgeführt. Dabei sind die einzelnen Disziplinen untereinander sowie auch von den Randbedingungen des Gesamtsystems abhängig. Deren Vielzahl sowie die daraus resultierenden notwendigen Einschränkungen können jedoch nur bis zu einem gewissen Maße repräsentiert und während der Entwicklung berücksichtigt werden. In der Folge ist der entwickelte Roboter nur begrenzt an das bereits vorhandene Gesamtsystem angepasst. Durch die geteilte Entwicklung kann die Funktionalität des kompletten Systems, abgesehen von einzelnen Simulationsmöglichkeiten, zusätzlich erst nach der Zusammenführung der Teilbereiche in einem aufwendigen Prototyp beurteilt werden. Bis dahin kann die Überprüfung nur eingeschränkt und abstrahiert am Rechner erfolgen.

Nicht zuletzt aufgrund der ständig steigenden Komplexität derartiger domänenübergreifender mechatronischer Aufgabenstellungen existieren unterschiedliche Methoden und Ansätze zu deren Bearbeitung. In Andreasen und Hein (1987) wird hierzu das Konzept der integrierten Produktentwicklung (integrated product development), welches auf das komplette Unternehmen angewendet wird, aufgezeigt. Es betrifft verschiedene Entwicklungsphasen von der Bedarfserkennung bis hin zu Produktion und dem Verkauf des Produkts und erfordert daher die Einbindung unterschiedlicher Disziplinen. Ein Überblick über aktuell angewendete Vorgehensweisen der Produktentwicklung, wie die Konstruktionsmethodik nach Pahl/Beitz oder integrative Vorgehensmodelle wie das V-Modell der Mechatronikentwicklung (VDI-Richtlinie 2206), wird in Gausemeier und Feldmann (2006) gegeben. Hier wird auch ein Vorgehensmodell für die Entwicklung integrierter mechanisch-elektronischer Baugruppen aufgezeigt, welches auf die Betrachtung des kompletten Produktentstehungsprozesses und eine domänenübergreifende Kommunikation und Kooperation aller Beteiligten abzielt.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war der Entwurf sowie die Implementierung eines Unterstützungssystems zur direkten und anschaulichen Entwicklung angepasster Kinematiken für Mechanismen und Roboter, welches als ein Werkzeug der Produktentwicklung eingeordnet werden kann. Dieses soll bereits während der Kinematiksynthese, durch Berücksichtigung der vorgegebenen Aufgabenstellung sowie der Randbedingungen, eine Anpassung des entwickelten Roboters an das Zielsystem ermöglichen. Zusätzlich soll eine Verbindung der notwendigen Arbeiten der einzelnen

Domänen und somit eine zeit- und kosteneffiziente Entwicklung realisiert werden. Durch eine Erweiterung der Ausgabemöglichkeiten gegenüber bestehenden Systemen soll eine zeitnahe und anschauliche Ergebnisdarstellung ermöglicht werden. Weiterhin soll die Möglichkeit einer zeitnahen Funktionsüberprüfung des neuen Systems verwirklicht werden.

## **1.1 Problemstellung**

Auf den Entwurf serieller Kinematiken für Mechanismen und Roboter wirken im Gegensatz zu den isolierten Prozessen der klassischen Getriebesynthese zahlreiche Herausforderungen ein. Dies beruht nicht zuletzt darauf, dass hier in ein Gesamtsystem eingebundene, mechatronische Systeme entwickelt werden. Speziell treten durch die Entwicklung unter Beteiligung verschiedener Disziplinen Probleme hinsichtlich der Anschaulichkeit sowie der frühzeitigen, verlässlichen Überprüfung der Funktionalität des Ergebnisses auf. Durch die Integration der hinsichtlich definierter Anwendungen zu entwickelnden Kinematik in ein Gesamtsystem, stellt sich zusätzlich das Problem der Berücksichtigung der vom Zielsystem vorgegebenen Randbedingungen. Diese technischen Probleme werden im Folgenden näher beschrieben.

### **1.1.1 Anschaulichkeit des Ergebnisses der Roboterentwicklung**

Gerade in multidisziplinären Entwicklungsvorhaben ist eine anschauliche Darstellung des aktuellen Entwicklungsstandes des Systems sowie des Entwicklungsergebnisses für alle Beteiligten von großer Bedeutung, so auch bei der Entwicklung neuartiger Kinematiken für Mechanismen und Roboter. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass das Erreichen dieser Anschaulichkeit mit minimalem Personal-, Sach- sowie Zeitaufwand realisiert werden kann. Gleichzeitig soll jedoch der Nutzen in Bezug auf die Förderung des Systemverständnisses sowie die damit verbundene Eigenschaftsfrüherkennung maximiert werden.

Nur durch eine leichte Verständlichkeit sowie Anschaulichkeit der Ausgabemöglichkeiten kann deren Verwendbarkeit für die weiteren Arbeitsschritte garantiert werden. Dies gilt speziell im Bereich räumlicher Kinematiken, welche einen mehrteiligen Aufbau sowie komplexe Geometrien besitzen. Ziel der Ausgabe ist hierbei, sich von den möglichen Abmessungen, Arbeitsbereichen etc. des Systems ein Bild machen zu können. Hierdurch werden beispielsweise die Möglichkeit von Eigenkollisionen des Systems und weitere konstruktive Eigenschaften sichtbar. Auf dieser Basis kann über die Weiterverfolgung des Lösungsansatzes entschieden werden (Abbildung 1.1).

### **1.1.2 Überprüfung der Funktionalität des Entwicklungsergebnisses**

Neben der Illustration der Geometrie des mechanischen Aufbaus und der kinematischen Eigenschaften des Entwicklungsergebnisses ist zusätzlich eine zeitnahe Darstellung dessen Funktion notwendig. Hierdurch kann die Tauglichkeit des Systems zur Erfüllung der gewünschten Aufgabe verifiziert werden. Diese muss vor allem in

Verbindung mit dem gesamten Zielsystem, der späteren Arbeitsumgebung des Mechanismus/Roboters betrachtet werden.

Hierzu können das System sowie seine Zielumgebung im Rechner abgebildet und die durchzuführenden Aufgaben simuliert werden. Neben der eingeschränkten Anschaulichkeit einer Simulation ist die Evaluierung der kinetischen Systemeigenschaften so nur mit hohem Aufwand erreichbar. Weiterhin kann aber auch ein realer Prototyp des Systems in die bereits vorhandene Zielhardware oder deren Modell integriert werden. Um dabei neben den räumlichen Eigenschaften des Systems auch dessen kinetische Eigenschaften während des Betriebs überprüfen zu können, muss der Prototyp zusätzlich aktuiert werden. Erst wenn durch die Versuche sichergestellt ist, dass die neu entwickelte Kinematik keine negativen Wechselwirkungen mit der Umwelt hervorruft, sollte das Konzept weitergeführt werden (Abbildung 1.2).

Der Aufbau von Prototypen, die Integration von Antrieben sowie die Steuerungsimplementierung bedeuten einen hohen Arbeitsaufwand. Da komplexe Entwicklungen erfahrungsgemäß, auch aufgrund wechselnder Vorgaben, iterativ in mehreren Optimierungsschritten ablaufen, hat neben der Hardware- auch die Ansteuerungserstellung mehrfach, für alle während des Entwicklungsprozesses vorkommenden Prototypen, zu erfolgen. Um dennoch den Erfolg der Entwicklung garantieren zu können, ist eine möglichst zeiteffiziente und mit geringem Kostenaufwand durchgeführte Entwicklung dringend erforderlich. Nur so kann eine kurze Zeit bis zur Markteinführung (time to market) eingehalten und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens gesichert werden.

### **1.1.3 Anpassung der Entwicklung an das Zielsystem**

Bei der oben beschriebenen Überprüfung der Funktionalität des Entwicklungsergebnisses wird ein Prototyp des entwickelten Systems in das Zielsystem oder dessen Modell integriert. Hierbei werden mögliche Fehler hinsichtlich der Anpassung des Mechanismus/Roboters sichtbar. Diese zeigen sich beispielsweise in Form von während der Bewegung auftretenden Kollisionen des Mechanismus/Roboters mit Elementen des Zielsystems. Grund hierfür ist meist die im Rahmen der Modellbildung sowie der Entwicklung und Optimierung fehlende Berücksichtigung des Zielsystems. Dies beruht unter anderem auf dem Fehlen geeigneter Eingabemöglichkeiten für die durch die Zielumgebung vorgegebenen Randbedingungen wie beispielsweise die verfügbaren Bau- und Arbeitsräume. Zudem wird die Entwicklung des mechatronischen Kinematik- sowie Ansteuerungsproblems meist sequentiell durchgeführt, wodurch nur einseitig optimale Lösungen erzielt werden.

Wird dann, in diesem bereits weit fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung, eine bereits ermittelte Lösung als ungeeignet erkannt, geht die Behebung dieses Problems mit einer erneuten Anpassung des Systems einher. Hierfür ist wiederum ein erhöhter Zeit- und Kostenaufwand notwendig (Abbildung 1.3). Aus diesem Grund müssen Methoden entwickelt und angewendet werden, mit welchen diese Probleme frühzeitig ausgeschlossen werden können.

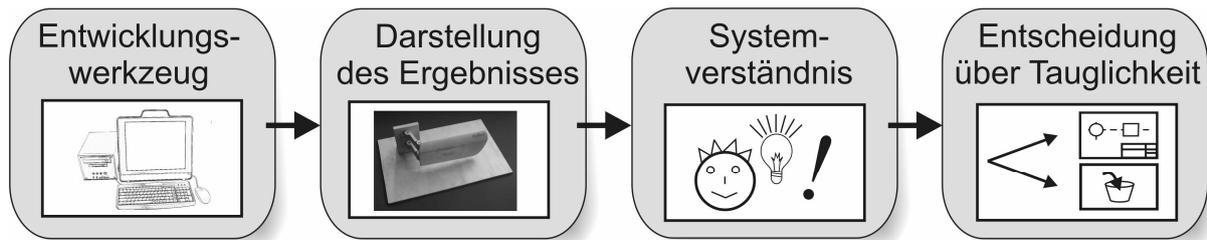


Abbildung 1.1: Die Darstellung des Syntheseresultates ist für den weiteren Entwicklungsprozess entscheidend. Durch das verbesserte Systemverständnis können Rückschlüsse auf die Tauglichkeit des Konzepts, dessen Weiterverfolgung oder Verwerfung gezogen werden.

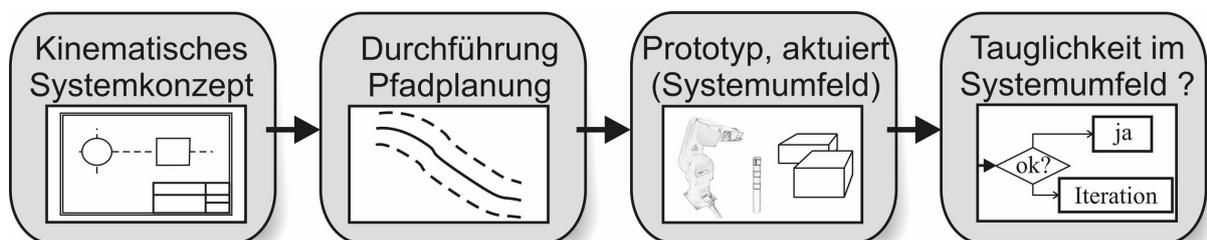


Abbildung 1.2: Nach der Durchführung der Pfadplanung für das kinematische Systemkonzept kann der Prototyp im Systemumfeld hinsichtlich der Aufgabenstellung aktuiert werden. Die hiermit mögliche Überprüfung der Funktionalität des Entwicklungsergebnisses entscheidet über die Tauglichkeit des Konzepts im Zusammenhang mit dem Systemumfeld.

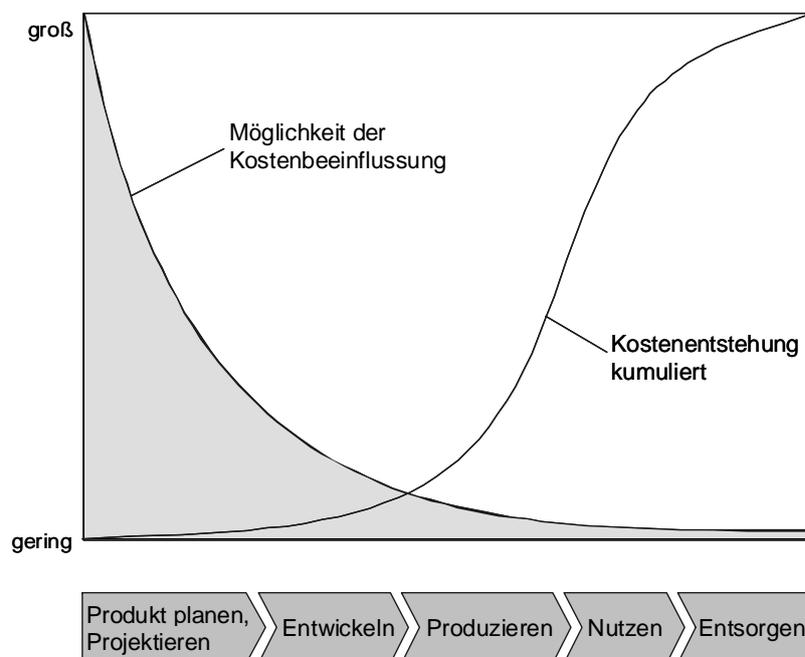


Abbildung 1.3: Kostenentstehung während des Produktentwicklungsprozesses: werden vorliegende Randbedingungen erst spät berücksichtigt, ergeben sich bei mangelnder Eignung der Lösung hohe Änderungskosten (Entnommen aus: Ehrlenspiel, 2007).

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Bei Betrachtung der vielfältigen Einsatzbereiche von Mechanismen und Robotern wird die große Fülle unterschiedlicher Aufgabenstellungen ersichtlich. In Abhängigkeit von deren Komplexität ist oft eine Anpassung bereits bestehender Kinematiken oder Robotersysteme nicht möglich. Folge hiervon ist die Notwendigkeit zur Entwicklung komplett neuartiger mechatronischer Systeme für eine definierte Aufgabenstellung. Hierdurch entsteht unter anderem ein hoher Zeit- sowie Personalaufwand, welcher sich wiederum in Kosten ausdrücken lässt. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Verbesserung der Möglichkeiten zur Entwicklung dieser anwendungsspezifischen Systeme und damit eine Steigerung der Effizienz des Produktentwicklungsprozesses. Hierzu sollen neuartige Ansätze zur zeitnahen Darstellung und Validierung von Entwicklungsergebnissen verfolgt werden. Zudem soll verbessert auf die individuellen Randbedingungen der Synthese von Mechanismen/Robotern eingegangen sowie eine Parallelisierung der Kinematik- und Steuerungsentwicklung durchgeführt werden. Die Ziele der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Verbesserte Ergebnisdarstellung durch Einsatz von Prototypen:**  
Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Verbesserung der Darstellung der Ergebnisse der Kinematikentwicklung. Hierbei soll, neben den bereits bekannten Verfahren, gezielt Rapid Prototyping (RP) zur Anfertigung von Prototypen eingesetzt werden. Diese sollen der Förderung des Systemverständnisses sowie der frühzeitigen Erkennung von Eigenschaften der entwickelten Systeme dienen (Eigenschaftsfrüherkennung). Nicht zielführende Lösungen können so rechtzeitig erkannt und verworfen werden. Durch dieses Vorgehen werden eine zielgerichtete Entwicklung sowie eine beschleunigte Lösungsfindung unterstützt. Dies ermöglicht eine geringere Produkteinführungszeit (time to market), welche einen maßgeblichen Wettbewerbsvorteil darstellt (Tseng, et al., 1998). Um mittels der neuartigen Ausgabemöglichkeit maximalen Nutzen zu generieren, muss diese leicht anzuwenden sein. Daher soll das Kinematik-Entwicklungssystem über eine direkte Schnittstelle zu den RP-Prozessen verfügen.
- **Zeitnahe Funktionsüberprüfung durch aktuierte, systemintegrierte Prototypen:**  
Weiterhin soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Überprüfung der Funktion der Roboterkonzepte mittels aktuierter Prototypen erfolgen. Hierfür ist neben der Entwicklung der Kinematik auch die Implementierung der Steuerung und somit die Realisierung einer domänenübergreifenden, mechatronischen Entwicklung vorgesehen. Durch eine einfache und zeitnahe Übertragung der entwickelten Steuerung auf den mit Aktoren ausgestatteten Prototyp soll eine Validierung der Kinetik des Systems ermöglicht werden. Anhand der Eigenschaften während des Betriebs der Funktionsprototypen, beispielsweise der auftretenden Beschleunigungen, kann so die Überprüfung des Entwicklungsergebnisses erfolgen. Wird der Prototyp in diesem Schritt zusätzlich in das

Zielsystem integriert, können Wechselwirkungen mit diesem erkannt werden. Hierbei werden beispielsweise Kollisionen während des Bewegungsablaufs erkennbar. Werden die aus der Synthese leicht abzuleitenden, einfachen Simulation mit der Erstellung und dem Betrieb von Funktionsmodellen kombiniert, wird eine zeitnahe Verifikation der des Endprodukts, im aktuellen Fall des Roboters, ermöglicht (Irlinger, et al., 2007). Durch diese Überprüfung der Konzepttauglichkeit (proof of concept) kann sichergestellt werden, dass die gewählte und im weiteren Vorgehen auch verfolgte Lösung exakt auf das Zielsystem und damit auch den beabsichtigten Markt abgestimmt ist.

- **Frühzeitige Anpassung an das Zielsystem:**

Bei der Entwicklung angepasster robotischer Systeme ist ein weiteres Ziel, neben deren frühzeitiger Überprüfung, auch die gezielte Abstimmung der Entwicklung auf bereits vorhandene Zielsysteme. Nur so können spät im Entwicklungsprozess auftretende Rückschritte aufgrund mangelnder Abstimmung mit den Randbedingungen des Zielsystems vermieden werden. Zur Realisierung dieser ziel- und marktgerichteten Durchführung der Entwicklung müssen vorhandene Informationen über das Zielsystem bereits während der Entwicklung verfügbar sein und mit einbezogen werden. Hierfür sollen Möglichkeiten zur Unterstützung der Entwicklungsvorgänge durch geeignete Vorgehensweisen zur Gewinnung dieser Informationen, wie beispielsweise den verfügbaren Bau- sowie Arbeitsräumen, eingesetzt werden. Mit deren Hilfe können die Entwicklung der Kinematik gezielter durchgeführt und damit spätere Anpassungen vermieden werden. Weiterhin sollen durch die kombinierte Entwicklung der Teilbereiche Kinematik und Ansteuerung entstehende Synergieeffekte genutzt werden. Diese tragen zusätzlich dazu bei, in kürzerer Zeit gesamthaft optimierte Systeme entwickeln zu können.

## 2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der mit vorliegender Arbeit in Zusammenhang stehende Stand der Technik dargestellt. Hierbei wird zunächst auf bereits verfügbare Methoden und Vorgehensweisen aus der Mechanismen- und Roboterentwicklung eingegangen. Weiterhin werden unterschiedliche Baukastensysteme zur Roboterentwicklung sowie verfügbare Möglichkeiten zur Darstellung des Ergebnisses einer Kinematikentwicklung aufgezeigt. Hierauf folgt ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik im Bereich generativer Fertigungsverfahren, deren Verwendung in der Mechanismen- und Roboterentwicklung sowie Methoden zur zeitnahen Erstellung von Ansteuerungscode (Rapid Control Prototyping, RCP). Zuletzt werden die Defizite des Stands der Technik in Bezug auf die aktuelle Problemstellung dargelegt.

### 2.1 Methoden der Mechanismen- und Roboterentwicklung

Vor dem Aufkommen der Robotik, welche sich mit Ausnahme der Parallelkinematiken mit zumeist räumlichen seriellen Kinematiken befasst, wurden im Bereich der Kinematikentwicklung vorwiegend ebene Gelenkgetriebe betrachtet. Diese bestanden aus geschlossenen kinematischen Ketten, deren Aktuierung über einen einzelnen Antrieb erfolgte.

Während der Entwicklung von Kinematiken können unterschiedliche Aufgabenstellungen betrachtet werden. Zunächst kann zum Zwecke einer Pfad-Erfüllung (path generation) ein beliebiges Element auf einer definierten Bahn bewegt werden. Die Ausrichtung des Elements bleibt dabei unberücksichtigt. Weiterhin kann bei der Starrkörperführung (rigid body guidance) ein Element entlang einer definierten Trajektorie bewegt werden. Dabei werden sowohl die Position als auch die Ausrichtung des Elements berücksichtigt. Schließlich kann innerhalb einer Funktionserzeugung (function generation) auch die Umsetzung einer vorgegebenen Bewegung in eine weitere erfolgen (Pucheta, 2005).

Die Entwicklung von Kinematiken beinhaltet für gewöhnlich zwei Aufgabenstellungen. Während einer anfänglichen Struktursynthese wird die geometrische Struktur eines Mechanismus zur Erfüllung der zu lösenden Bewegungsaufgabe ermittelt. Ergebnis dieser Struktursynthese sind die Anzahl sowie die Art der verwendeten Elemente (Gelenke, Getriebeglieder) sowie deren gegenseitige Zuordnung. In der nachfolgenden Maßsynthese werden die Abmessungen (Längen) der Getriebeglieder festgelegt. Beide Aufgabenstellungen werden zumeist getrennt voneinander betrachtet. Zuletzt erfolgt während einer Analyse die Überprüfung der Funktionalität der entwickelten Systeme. Weiterhin kann die Roboterentwicklung aber auch alleinig aus der steuerungsseitigen Anpassung bereits vorhandener und mathematisch definierter Systeme bestehen (Pfadplanung).

Zur Durchführung der Kinematikentwicklung existieren neben Forschungsarbeiten zur Realisierung einzelner Arbeitsschritte auch umfassende Programmpakete. Bei-

spiele hierfür sind die in Mathematiksoftware integrierte Entwicklungsumgebung MATTOOL (Berger & Matthes, 2006), SphinxCAM-Pro/E (Larochelle, et al., 2006) oder auch weitere Programme, welche beispielsweise in der DMG-Lib (Corves & Brix, 2009) zu finden sind.

Die ehemals unabhängig voneinander existierenden Arbeitsgebiete der Mechanismen- sowie der Roboterentwicklung werden heute zunehmend miteinander verknüpft. Nachfolgend wird daher zunächst auf die frühen geometrischen Verfahren zur Mechanismenentwicklung eingegangen. Daraufhin werden neuere Entwicklungsmethoden wie die Graphentheorie, FEM-basierte Methoden sowie Optimierungsansätze aufgezeigt. Zuletzt werden grundlegende Methoden zur Beschreibung von Robotern sowie zur Pfadplanung dargestellt.

### **2.1.1 Geometrische Verfahren zur Mechanismenentwicklung**

Geometrische, analytisch lösbare Verfahren stellen die ältesten Methoden zur Kinematikentwicklung dar. Ihre Anwendung adressiert zumeist das Problem der Maßsynthese für geschlossene kinematische Ketten. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Auslegung von Viereckstrukturen, mit welchen eine vorab definierte Bewegung realisiert werden soll. Bei den Verfahren aus dem Bereich der Maßsynthese können Exaktlagen- sowie näherungsweise Syntheseverfahren unterschieden werden.

Zu den Exaktlagenverfahren zählen die Zwei-, Drei-, Vier-, sowie die Fünf-Lagen-Synthese (Abbildung 2.1), basierend auf der Kinematikbeschreibung und -entwicklung nach Reuleaux (1875) sowie Burmester (1888). Mit diesen, unter anderem in Luck und Modler (1995) aufgegriffenen Verfahren, können ebene Vierecke ermittelt werden, mit welchen vorgegebene Punktlagen (Darstellung der Position sowie Orientierung eines Elements) durch ein Koppeldreieck erreicht werden können. Aufgrund der neun freien Parameter aus den Längen und Gelenkpositionen eines Vierecks besteht theoretisch die Möglichkeit, mit diesem neun Punktlagen exakt zu erreichen. Jedoch sind mit vertretbarem Aufwand nur sieben Punktlagen erreichbar (Irlinger, 1993). In Lohse (1983) wird mit der Lagenscharsynthese ein Verfahren zur näherungsweisen Synthese von Vierecken hinsichtlich einer beliebigen Anzahl unterschiedlicher Lagen vorgestellt.

Weiterführende Arbeiten im Bereich der Auslegung von Viereck-Kinematiken wurden unter anderem von Roberts (1875) zur Findung von Ersatzgetrieben sowie von Grübler (1917) zur Ermittlung der Freiheitsgrade eines Mechanismus vorgestellt. In Bloch (1951) sowie Hain (1963) werden diese Vorgehensweisen wieder aufgegriffen.

Eine Erweiterung der Synthese ebener Kinematiken stellt die Entwicklung sphärischer Vierecke dar. Diese wird in Meyer zur Capellen (1965) vorgestellt sowie später von Ketchel und Larochelle (2007) rechnerisch abgebildet und mit einer CAD-Ausgabemöglichkeit verknüpft.

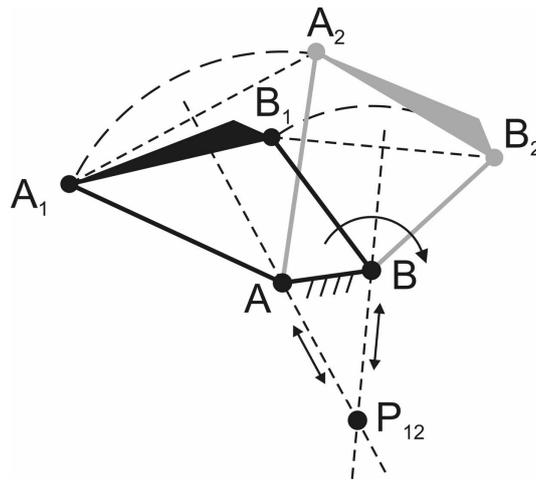


Abbildung 2.1: Geometrisches Exaktlagenverfahren für die Viergelenksentwicklung: Zwei-Lagen-Synthese. Die Koppel eines Viergelenks wird um die gestellfesten Punkte  $A$  und  $B$  von dem in  $B$  gelegenen Antrieb von der Lage  $A_1B_2$  in die Lage  $A_2B_2$  gedreht. Der Drehpol der Bewegung befindet sich in  $P_{12}$ .

### 2.1.2 Ermittlung der Roboterstruktur mittels Graphentheorie

Aus dem Bereich der Struktursynthese ist die Ermittlung der Roboterstruktur mit Hilfe der Graphentheorie bekannt, welche beispielsweise von Sohn und Freudenstein (1986) oder auch Pucheta und Cardona (2005) angewendet wird. Während des Syntheseprozesses werden die Anzahl, die Art sowie die gegenseitige Anordnung der Kinematikelemente eines betrachteten Mechanismus/Roboters variiert. Um ein systematisches Vorgehen realisieren und die Komplexität beherrschen zu können, wurden Beschreibungsformen zur Katalogisierung der dabei entstehenden Getriebe sowie zur Hinterlegung derer Eigenschaften entwickelt. Die Getriebe werden dabei aus Grundelementen erstellt und in Katalogen/Atlanten aufgelistet. Zur Referenzierung der einzelnen Kinematiken wird ein charakteristischer Repräsentationscode verwendet. Die Atlanten enthalten Skizzen eines topologischen Graphs der Kinematik sowie eine daraus erstellte charakteristische Adjazenzmatrix (Ding & Huang, 2007a). Der Graph stellt Informationen über den Aufbau der Kinematiken aus einzelnen Knoten (vertices), welche die Glieder der Kinematik darstellen, sowie verbindenden Kanten (edges), welche sich auf die Gelenke beziehen, dar. Durch Untersuchung der Graphen können Isomorphismen (Kombinationen mit gleichen Eigenschaften) aufgedeckt und starre Unterketten sowie vorhandene Freiheitsgrad-Arten ermittelt werden (Ding & Huang, 2007b).

In Pucheta und Cardona (2007) wird die Graphentheorie für die Struktursynthese planarer, aus rotatorischen sowie prismatischen Elementen bestehender Mechanismen vorgeschlagen. Die Anforderungen der Synthese (Zwangsbedingungen, Bewegungen etc.) werden hierzu in einem Initialgraph festgehalten. Mittels eines degree code der Adjazenzmatrix werden isomorphe (typgleiche) Kinematiken ermittelt. Besitzen unterschiedliche kinematische Konfigurationen denselben degree code, können sie auf eine reduziert werden. Bei der Erstellung des Atlas (Abbildung 2.2) wur-

den die Richtlinien von Freudenstein und Maki zur Vermeidung von Singularitäten, abhängig von der Anzahl prismatischer Gelenke sowie der Anzahl aufeinander folgender Schubgelenke, herangezogen und weiter entwickelt.

Als Erweiterung können zusätzliche Informationen wie die Gelenkart durch Verwendung unterschiedlicher Farben in den Graphen hinterlegt werden (Tang & Liu, 1993).

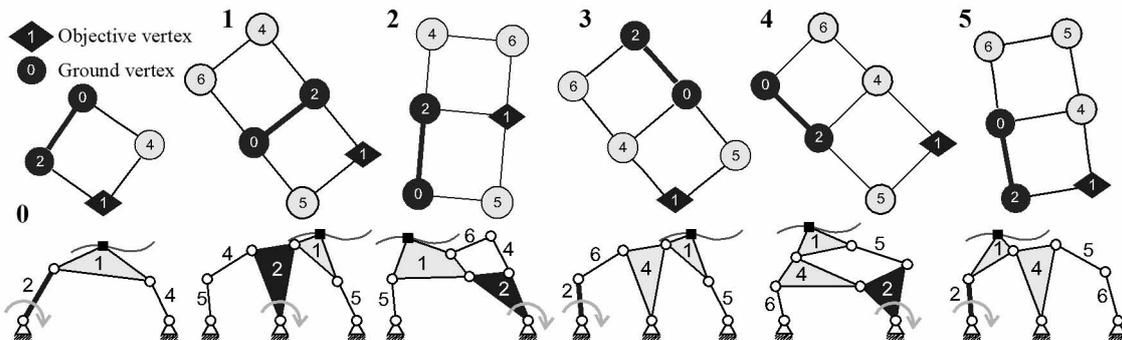


Abbildung 2.2: Teil eines Atlases nicht isomorpher Getriebemöglichkeiten mit einem Freiheitsgrad, aufgebaut aus beweglichen Koppelgliedern (objective vertex) sowie gestellfesten Gliedern (ground vertex); Entnommen aus: Pucheata & Cardona, 2007.

### 2.1.3 Entwicklungsmethoden mit FEM-Einsatz

Finite-Elemente-Methoden werden in der Kinematikentwicklung unter anderem von Rankers (2002) zur Simulation bzw. zur Analyse von Kinematiken verwendet. Die Kinematik wird dabei in einzelne Teile zerlegt. Relativbewegungen, Rand- bzw. Anfangsbedingungen (z. B. Vorgabe von Geschwindigkeiten) werden definiert und die kinematischen (Positionen und deren Ableitungen) sowie kinetostatischen Aspekte (Belastungen) ermittelt.

Neben der Betrachtung kinematischer Aspekte beschäftigen sich einige Forschergruppen im Rahmen einer Struktursynthese auch mit der Untersuchung in Mechanismen auftretender Belastungen. Hierzu wird von Lu und Kota (2006) eine Optimierung nachgiebiger Kinematikstrukturen (compliant mechanism) hinsichtlich auftretender Spannungen durchgeführt. Im Gegensatz zu den herkömmlich betrachteten Kinematiken beinhalten diese Strukturen Festkörpergelenke anstelle von Gelenken.

### 2.1.4 Roboterentwicklung und Optimierung

Weite Verbreitung bei der Entwicklung von Kinematiken finden Optimierungsverfahren. Dabei werden bereits definierte Systeme bzw. Systemgruppen beispielsweise mittels genetischer Algorithmen iterativ verändert. Die Optimierung geschieht jeweils hinsichtlich einer vorab definierten, von der jeweiligen Anwendung abhängigen Zielfunktion. Dabei ist das Vorgehen an die biologische Evolution angelehnt. Ausgangspunkt bilden mit zufälligen Werten initialisierte Anfangskonfigurationen (points) eines

betrachteten Problems. Die Individuen können jeweils verändert werden (mutation), oder auch ihre Eigenschaften untereinander austauschen (crossover). Die erhaltenen Elemente werden daraufhin hinsichtlich deren Qualität (fitness) bewertet. In Abhängigkeit von deren Höhe ist die Wahrscheinlichkeit der Auswahl des Elements (selection) für die nächste Generation wahrscheinlicher. Ergibt sich bei weiterer Veränderung keine Verbesserung der Fitness mehr, wird das aktuelle Element als Optimum ausgewählt (Peterson, 2008). Durch diese Methode können unter anderem analytisch nicht lösbare Probleme bewältigt werden.

Die Fitness der Roboter kann bezüglich individuell definierter Kriterien bestimmt werden. Ein erster Trend zur Roboterbewertung war vor allem deren Bewertung hinsichtlich ihrer Flexibilität und Vielseitigkeit (manipulability), wie in Yoshikawa (1984) vorgestellt. Daneben kann aber auch die Erfüllung der Zielbewegung, die Ansteuerung der Antriebe, die Einhaltung räumlicher Rahmenbedingungen oder, wie heute zu meist angewandt, eine Kombination von Kriterien verwendet werden (multikriterielle Optimierung). Beispiele für die Anwendung dieser Optimierungskriterien werden im Folgenden aufgezeigt. Weiterhin wird ein Beispiel zur Verbesserung des Optimierungsverfahrens, des Algorithmus selbst, vorgestellt.

### **Roboterbewertung hinsichtlich ihrer Manipulierbarkeit (manipulability)**

Frühe Arbeiten im Bereich der Bewertung von Roboterkinematiken sind in Yoshikawa (1984) sowie Yoshikawa (1985) zu finden. Diese Artikel beschäftigten sich mit der Flexibilität und Vielseitigkeit der untersuchten Kinematik, welche mit Hilfe einer Manipulierbarkeits-Kennzahl (manipulability measure), als Kriterium für die Erfüllung einer Bewegungsaufgabe, bewertet wurde. Hierdurch wurde eine Bewertung hinsichtlich der Vermeidung von Singularitäten sowie Hindernissen durchgeführt. Mit der hierzu von Yoshikawa formulierten Kennzahl kann die Fähigkeit eines Roboters, ein Objekt zu positionieren und auszurichten, quantitativ beurteilt werden. Weiterhin bildete er aus den Vektoren der möglichen maximalen Geschwindigkeiten eines Roboters in einer betrachteten Position ein Ellipsoid. Dies ermöglicht die Ermittlung von Positionen maximaler Beweglichkeit im Arbeitsraum (optimal postures, optimal working positions). Die erhaltenen Ergebnisse können z. B. zur Optimierung des Roboters durch Variation der Lenkerlängen verwendet werden.

Derselbe Sachverhalt kann jedoch auch als Maß für die Exaktheit der ausgeübten Kräfte eines Roboters herangezogen werden (Salisbury & Craig, 1982). Mit dieser Bewertung kann dann auch die optimale Arbeitsposition für den Roboter in Abhängigkeit von der Aufgabe ermittelt werden. Weitere Bewertungen von Robotern hinsichtlich deren Fertigkeit werden in Klein und Blaho (1987) während einer Variation der Längen der Roboterglieder sowie in Bi und Zhang (2001) zur Roboterentwicklung hinsichtlich definierter Lagen, unter Berücksichtigung kinematischer und dynamischer Eigenschaften der Lösung, durchgeführt.

Mayorga und Carrera (2006) beschreiben weitere Optimierungsansätze unter Verwendung eines neuartigen, aus der Jakobimatrix abgeleiteten Manipulierbarkeits-Index (manipulability index). Die Berechnungen hierzu wurden in Matlab® (The MathWorks™) implementiert.

### **Bewertung hinsichtlich der Erfüllung der Zielbewegung**

Neben der Bewertung von Robotern hinsichtlich ihrer Manipulierbarkeit können diese auch im Hinblick auf eine vorgegebene Zieltrajektorie untersucht werden. Eine Anwendung dieser Bewertungsmöglichkeit wird in Chedmail und Ramstein (1996) aufgezeigt. Unter Vermeidung von Kollisionen werden hier die Konfiguration eines Roboters (Gliedanzahl, Gelenktypen) variiert sowie die Dimensionen der Glieder mit Hilfe eines genetischen Algorithmus optimiert.

Ein Ansatz zur Optimierung von Viergelenken hinsichtlich einer vorgegebenen Trajektorie ist in Todorov (2003) zu finden. Dabei wird eine Kombination aus der Freudensteingleichung sowie dem Tschebyschew-Formalismus angewendet. Der näherungsweise Berechnung des Viergelenks mittels der Freudensteingleichung folgt dessen Optimierung mit Hilfe des Tschebyschew-Formalismus.

Ebenfalls hinsichtlich der Bewegungsbahn werden in Sancibrian, et al. (2006) ebene Mechanismen bezüglich ihrer Abmessungen optimiert. Die Vorgaben (Trajektorie, geometrische Bedingungen, Kollisionsvermeidung etc.) werden dabei über Gleichungen definiert. Zur Optimierung werden lokale Methoden wie die Jakobimatrix oder Taylor-Reihen sowie das Gradientenverfahren verwendet. Die Kontinuitätsmethode (continuation method) und genetische Algorithmen werden als globale Methoden verwendet.

Vor der Entwicklung und Bewertung einer Kinematik hinsichtlich ihrer Zielbewegung hat deren Definition zu erfolgen. Diese kann beispielsweise wie in Wann und Lohe (2006) vorgestellt mittels Bewegungsskizzen sowie -tabellen geschehen. Daneben wurde in Richter, et al. (2009) eine anschauliche Definitionsmethode mit Hilfe eines Roboterarbeitsplatzes vorgestellt. Auf diese wird, aufgrund der späteren Verwendung im vorliegenden System, nachfolgend näher eingegangen. Grundlage der Methode ist die Eingabe der gewünschten Trajektorie mit Hilfe eines kraft-/ momentengesteuerten Roboterarms. Dieser befindet sich direkt im Zielsystem, trägt das betrachtete Objekt und wird manuell mit Hilfe der Regelung bewegt. Zur Beschreibung der durchgeführten Bewegung werden Koordinatentransformationen verwendet. Voraussetzung der Trajektorien-Definition ist zunächst eine Referenzierung des Koordinatenursprungs des Zielsystems ( $base_{Zielsys}$ ) gegenüber dem des Eingaberoboters ( $base_{Rob}$ ). Diese Bestimmung der Lage des Zielsystems zur Position des Roboters geschieht über die Ermittlung der Transformation  ${}^{base,Zielsys}T_{base,Rob}$ . Hiermit, sowie durch Lösung des direkten kinematischen Problems unter Einbeziehung jedes der  $n$  Gelenke ( $Gelenk_i$ ) des Roboters kann die Position des bewegten Elements ( $tcp$ ) mit der des ortsfesten Systems ( $base_{Zielsys}$ ) in Verbindung gebracht werden. Die Definiti-

on der Bewegung des betrachteten Objekts erfolgt durch die Bestimmung zeitdiskreter Positionen des tcp unter Zuhilfenahme der Roboter gelenkwinkel. Unter Verwendung dieses Vorgehens ergeben sich die einzelnen frames bzw. Posen (Position sowie Ausrichtung) einer im Rahmen einer Kinematiksynthese zu erfüllenden Trajektorie in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  allgemein zu:

$${}^{base_{Zielsys}}T_{tcp}(t) = {}^{base_{Zielsys}}T_{base_{Rob}} \cdot {}^{base_{Rob}}T_{Gelenk_1}(t) \cdot {}^{Gelenk_1}T_{Gelenk_2}(t) \cdot \dots \cdot {}^{Gelenk_n}T_{tcp}(t). \quad (2.1)$$

### Berücksichtigung der Ansteuerung während der Bewertung

In einzelnen Forschungsarbeiten wird ein Mechanismus/Roboter auch im Hinblick auf dessen Ansteuerung optimiert. Eine derartige Optimierung wird in Connor, et al. (1995) während der Maßsynthese eines Fünfgelenks mittels eines genetischen Algorithmus durchgeführt. Ziel war hierbei, die Ansteuerung eines Servomotors möglichst gleichmäßig erfolgen zu lassen. Weitere berücksichtigte Kriterien waren die Abweichung der erzielten Bewegung von der Vorgabetrajektorie sowie die auftretenden Übertragungswinkel.

Auch in Hornby und Lipson (2003) wird bei der Entwicklung 3-dimensionaler Laufroboter neben deren Morphologie auch die Ansteuerung betrachtet. Während der Optimierung wird das System hierbei stufenweise mit Hilfe eines evolutionären Prozesses variiert. Der notwendige Fitness-Faktor zur Bewertung einzelner Konfigurationen wird durch Betrachtung der Bewegung des Massenschwerpunktes ermittelt.

### Räumliche Rahmenbedingungen während der Roboterentwicklung

Neben den bereits genannten Optimierungskriterien werden auch räumliche Rahmenbedingungen, etwa verfügbare Bau- und vorhandene Arbeitsräume, bei der Entwicklung von Mechanismen/Robotern berücksichtigt. Dies kann bereits während der Synthese sowie auch später während der Pfadplanung (Kapitel 2.1.5) geschehen.

Bereits in Roth (1975) wurde eine Gegenüberstellung von Roboter und Arbeitsraum zur Bewertung von Kinematiken durchgeführt. In Gupta und Roth (1982) wurden weiterhin Konstruktionshilfen für die Entwicklung von Sechssachs-Robotern hinsichtlich ihres Arbeitsraumes aufgezeigt. Hollerbach (1985) stellte einen 7 DOF-Roboter zur Vermeidung von Singularitäten sowie zur Hindernisumgehung vor, bei welchem neben weiteren Kriterien auch ein optimierter Arbeitsraum berücksichtigt wurde. Kucuk und Bingul (1993) bewerteten unterschiedliche Roboter, realisiert aus verschiedenen Gelenkarten, mitunter hinsichtlich des gesamten Arbeitsraumes. Dabei wurde zwischen dem erreichbaren Arbeitsraum (reachable workspace), in welchem lediglich die Erreichbarkeit der enthaltenen Positionen gewährt ist, sowie dem Arbeitsraum in welchem jede beliebige Orientierung erreicht werden kann (dexterous workspace), unterschieden. Durch die Betrachtung des gesamten Arbeitsraumes war zu erken-

nen, dass die Kinematik mit globalem Maximum nicht zwangsläufig auch lokal die beste Option sein muss.

Grafische Methoden zur Beschreibung der Bau- und Arbeitsräume von Robotern wurden in Kumar und Patel (1986) vorgestellt. Hierfür wurden Methoden aus dem Bereich der Computergrafik verwendet. Der Arbeitsraum, welcher zur Kinematikanalyse sowie für die Design- und Bewegungsplanung verwendet werden kann, wird dabei durch Punkte in Schnittebenen dargestellt. Diese wiederum werden unter Verwendung von Bitmap-Bildern gespeichert. In diesem Zusammenhang beschreibt Latombe (1993) den Arbeitsraum mittels ebenfalls schichtweise aufgebauten Hindernissen aus Polygonzügen.

Bei Verwendung der Synthesoftware SAM (Rankers, 2002) können bei der Entwicklung ebener Getriebe ebenso vereinfachte Bauräume in Form ebener Polygonzüge berücksichtigt werden. Zu deren Definition wird eine Schnittstelle der Software zur CAD-Anwendung AutoCAD verwendet. Das Softwarepaket APPROX (Strauchmann, 2009) verwendet einfache, rechteckige Bauräume als Randbedingungen für die Synthese.

Eine gängige Bewertungsmöglichkeit für Roboter ist auch die Gegenüberstellung des erzielbaren Arbeitsraums zu deren Eigenvolumen. Lin und Freudenstein (1986) optimieren so die Lenkerlängen einer dreigliedrigen seriellen Kinematik hinsichtlich des erzielbaren Arbeitsraumes. Durch Berücksichtigung des besten Verhältnisses von Arbeitsraum (Integral über die Arbeitsraum-Schnittflächen entlang einer Achse) zu leerem Raum, in welchem der Roboter nicht eingesetzt werden kann, wird hier die optimale Konfiguration ermittelt. Weiterhin werden in Pott und Schwarz (2007) unterschiedliche, nicht mittels Synthese ermittelte Kinematiken von Medizinrobotern hinsichtlich ihres Arbeitsraumes bewertet. Dabei wird nach der numerischen Ermittlung des Arbeitsraumvolumens dieses zum Bauraum ins Verhältnis gesetzt. Die Bewertung erfolgt quantitativ mittels der erhaltenen Kennzahlen sowie zusätzlich qualitativ unter Verwendung einer grafischen Darstellung in der Oberfläche der Software Matlab<sup>®</sup>. Gerade bei diesen medizinischen Anwendungen ist eine möglichst geringe Eigengröße der Assistenzroboter relevant, um dem Chirurgen den Zugang zum Situs am Patienten gewährleisten zu können. In diesem Zusammenhang wird in Lum, et al. (2004) ein Roboter mit sphärischer Kinematik zur minimalinvasiven Chirurgie hinsichtlich des benötigten Arbeitsraumes, welcher in Versuchen ermittelt wurde, sowie der eigenen Größe optimiert. Daneben werden die Isotropie des Mechanismus (mechanism isotropy) sowie die Manipulierbarkeit (manipulability) berücksichtigt.

Die mit einem Roboter erzielbaren Arbeitsräume stellen eine direkte Folge seiner Konfiguration dar. Jedoch können sich mögliche Arbeitsräume auch in Abhängigkeit von den vorgegebenen Bauräumen des Gesamtsystems ändern. So kann, wie in Gardner und Velinsky (2000) beschrieben, die Manipulierbarkeit eines Roboters auch von dessen Grundposition im Bauraum (hier auf einem Fahrzeug) sowie der definierten Bewegungsaufgabe beeinflusst werden. Bei gleich bleibender Konfiguration wurden in diesem Beispiel die durch verschiedene Grundpositionen verursachten Ände-

rungen der Manipulierbarkeit aufgezeigt. Die Darstellung des Ergebnisses erfolgte anhand von Manipulierbarkeits-Ellipsen (Abbildung 2.3).

Sämtliche im aktuellen Kapitel vorgestellte Möglichkeiten zur Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen während der Roboterentwicklung resultieren in einer Anpassung der Struktur sowie der Abmessungen des Roboters. Darüber hinaus kann jedoch auch, wie bei einigen Methoden der Pfadplanung (Kapitel 2.1.5) zu finden, die Umwelt hinsichtlich des Roboters angepasst werden.

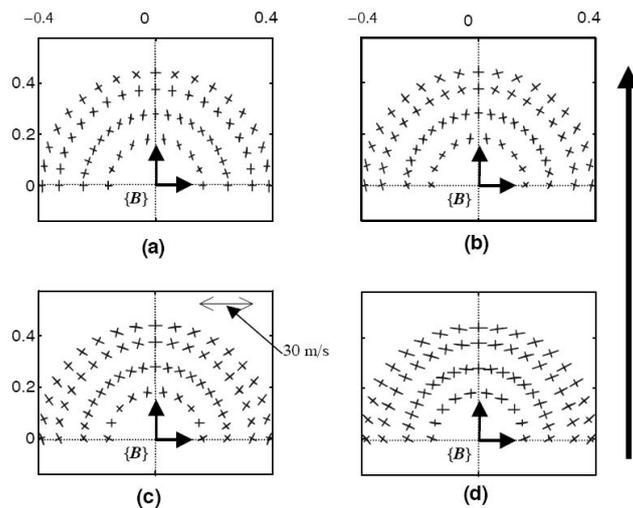


Abbildung 2.3: Darstellung der Manipulierbarkeits-Ellipsen in der  $x/y$ -Ebene (horizontale Ausrichtung) bei verschiedenen Grundpositionen des Manipulators auf dem Fahrzeug. Die Fahrtrichtung des Fahrzeugs ist entlang der  $y$ -Achse (Pfeil) gerichtet (Entnommen aus: Gardner & Velinsky, 2000).

### Weitere Optimierungskriterien

Neben den oben genannten Kriterien können zur Optimierung von Robotern auch weitere, im Hinblick auf den Anwendungsfall relevante, Merkmale betrachtet werden. So wurden von Kim und Khosla (1993) unter anderem die kinematische (Gelenkver-schränkung und Offset) sowie die mechanische Einfachheit (nur ein Antrieb pro Gelenk) des Roboters als Optimierungskriterien verwendet.

Weiterhin wurde beispielsweise von Bolognini, et al. (2007) die Struktur einer Antenne unter Verwendung der Software Matlab<sup>®</sup> optimiert. Die Menge der gespeicherten Energie, die Verlustenergie, sowie die Resonanzfrequenz und weitere Randbedingungen (constraints) wurden dabei als Kriterien verwendet.

### Möglichkeiten zur Verbesserung des Optimierungs-Algorithmus

Um eine schnelle Zielerreichung zu unterstützen wird, neben der Modifikation von Optimierungskriterien, auch an einer Verbesserung der Optimierungsalgorithmen selbst geforscht. In Vale und Shea (2002) werden so intelligente Strategien zur Modifikation von Strukturen während eines Optimierungsprozesses vorgestellt. Als

Hauptmerkmal der Methode wird der Erfolg bereits durchgeführter Modifikationen bewertet und bei den folgenden Variationen berücksichtigt. Unproduktive Variationen sollen so durch den Einfluss eines Modifikationsratgebers (modification advisor) vermieden werden. Weiterhin werden Möglichkeiten zur Vermeidung des Verbleibens in lokalen Optima integriert.

### **2.1.5 Beschreibungsformen bestehender Robotersysteme und Pfadplanung**

Beim Einsatz von Robotern werden gerade in der Automatisierungstechnik oft marktverfügbare Standardsysteme, z. B. der Sechssachsknickarmroboter, verwendet. Diese sind dann seitens der Mechanik nicht speziell an die durchzuführende Aufgabe sowie die einsatzspezifischen Randbedingungen wie z. B. Arbeitsräume angepasst. Zur dieser Anpassung steht ausschließlich die Softwareseite des Systems zur Verfügung, welche Methoden zur Bewegungs- oder Pfadplanung sowie zur Programmierung der Roboter umfasst. Hierfür müssen die Roboter sowie das Arbeitsumfeld geometrisch (räumlich) beschrieben werden.

Für die Beschreibung der Konfiguration des Roboters aus einzelnen Gliedern mit meist rotatorischen Gelenken sind verschiedene mathematische Modelle bekannt. Die ersten Möglichkeiten der Beschreibung von Kinematiken waren geometrisch geprägt und wurden bereits von Reuleaux (1875) aufgezeigt (siehe auch Kapitel 2.1.1). Mit Denavit und Hartenberg (1955) wurde eine Beschreibungsform auf Basis homogener Transformationsmatrizen veröffentlicht. Dieses Vorgehen bildet die Grundlage der heute zumeist angewendeten Roboterbeschreibung. Auch Lee (1982) verwendet diese Notation zur Beschreibung der Kinematik, Dynamik sowie Steuerung von Robotern. Der aus Starrkörpern aufgebaute Roboter enthält dabei rotatorische sowie prismatische Gelenke. Den Roboterelementen sind nach der Denavit-Hartenberg-Notation feste, gerichtete Koordinatensysteme (frames) zugeordnet welche einen gemeinsamen Ursprung besitzen und orthonormale Transformationen beschreiben. In den Transformationsmatrizen können die Positionsverschiebung, die Verdrehung sowie der Skalierungsfaktor und die Perspektive abgebildet werden (Craig, 1989). Die starren Glieder mit je zwei Gelenken werden durch die Achsverdrehung  $\alpha$ , die Elementlänge  $a$ , die Offset-Distanz  $d$  sowie den Gelenkwinkel  $\theta$  beschrieben (Abbildung 2.4). Bei der Beschreibung des Gesamtsystems wird zwischen Parametern (festgelegt durch die Geometrie) sowie Variablen (festgelegt durch die Bewegung) unterschieden. Das System sowie seine Bewegung werden durch das Kettenprodukt der Transformationen festgelegt. Auch Asada und Slotine (1986) verwenden diese Beschreibungsform. Die Koordinatensysteme (KOS) der einzelnen Achsen sind so angeordnet, dass die  $x$ -Achse jeweils die Drehachse des voran gegangenen Gelenks ( $z$ -Achse) in rechtem Winkel schneidet. Für ein prismatisches Gelenk ist die Achse der Bewegung ebenfalls die  $z$ -Achse.

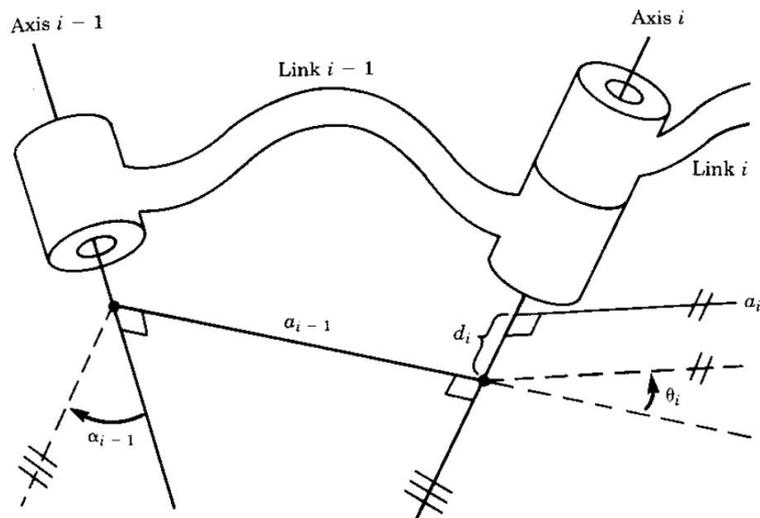


Abbildung 2.4: Darstellung von Robotersegmenten und ihre Festlegung über unterschiedliche Parameter wie die Achsverdrehung  $\alpha$ , die Elementlänge  $a$ , der Offset-Distanz  $d$  sowie den Gelenkwinkel  $\theta$  (Entnommen aus: Craig, 1989).

Neben der Denavit-Hartenberg-Notation können Roboter zudem mittels Quaternionen beschrieben werden. Diese Möglichkeit wurde in Yang und Freudenstein (1964) vorgestellt.

Darüber hinaus wurden weitere Nomenklaturen für die Elemente der Kinematiken entwickelt. In Wampler (2007) werden die Roboter-Bauelemente beispielsweise in Glieder (links) sowie Gelenke (joints) unterteilt. Speziell im Bereich der Forschung werden auch Baukastensysteme standardisierter Elemente zum modularen Aufbau von Robotern betrachtet. Auf diese soll in Kapitel 2.2 näher eingegangen werden.

Zunächst soll jedoch auf die Verwendung der Roboterbeschreibungen im Rahmen einer softwareseitigen Anpassung sowie Pfadplanung eingegangen werden. Diese wird durchgeführt, wenn wie in Gardner und Velinsky (2000) beschrieben während der Anpassung eines Roboters an die Aufgabenstellung dessen kinematische Konfiguration beibehalten, jedoch an deren Stelle die Einbauposition sowie die Art der Ansteuerung der Antriebe variiert wird.

Neben der reinen Pfadplanung wird häufig gleichzeitig auch eine Kollisionserkennung durchgeführt. Eine derartige Pfadplanung mit Vermeidung von Hindernissen wurde bereits von Moravec (1980), Brooks und Lozano-Pérez (1982) sowie Lozano-Pérez (1983) grundlegend als geometrisches Problem der Überschneidung konvexer Polygone beschrieben. In der von Brooks und Lozano-Pérez (1982) beschriebenen kollisionsfreien Pfadplanung werden sowohl der Roboter als auch Hindernisse im Arbeitsraum betrachtet. Die Objekte im Arbeitsraum werden als schichtweise aufgebaute, polygonale Starrkörper definiert und über Referenzpunkte in ihrer Position festgelegt. Während der Pfadplanung werden Fallunterscheidungen zur Überschneidung geometrischer Formen durchgeführt. Zur Festlegung des optimalen Pfades wird vorgeschlagen, zusätzlich kinematische sowie dynamische Charakteristiken des Systems zu berücksichtigen.

In Lozano-Pérez (1983) wird zudem auch untersucht, wie Objekte ohne Kollision im Konfigurationsraum bewegt werden können. Die Objekte werden als konvexe Hüllen, Polygone oder Polyhedren sowie sich schneidende Halbräume (intersecting half-spaces) dargestellt. In diesem Artikel wird auf die in der Robotik existierenden Findspace- sowie Findpath-Probleme näher eingegangen, bei welchen entweder ein Raum gesucht wird, in welches ein vorhandenes Objekt hinein passt, oder aber ein Pfad für ein Objekt durch einen definierten Raum gesucht wird. Die Darstellung der Roboter mittels Flächen in 2D-Umgebungen wird unter anderem von Nethery und Spong (1994) wieder aufgegriffen. Zur Darstellung räumlicher Probleme kann eine Repräsentation der Elemente mittels deren Außenabmessungen umfassender Volumina (bounding boxes) sinnvoll sein. Diese wird beispielsweise in van Beek & de Jager (1997) verwendet (Abbildung 2.5).

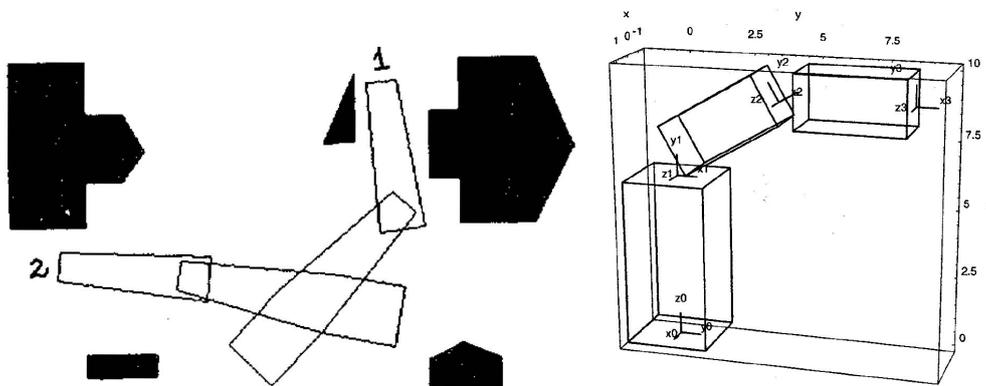


Abbildung 2.5: Roboterdarstellung im Bereich der Pfadplanung durch Polygone und Bounding-Boxes (Entnommen aus: Lozano-Pérez, 1987 sowie van Beek & de Jager, 1997).

Vereinzelt wird die Pfadplanung auch parallel zur Entwicklung der Kinematik selbst durchgeführt. In Chedmail und Ramstein (1996) erfolgt in diesem Zusammenhang die Entwicklung eines Mechanismus/Roboters im Hinblick auf dessen Bewegungsaufgabe. Weitere Arbeiten in diesem Bereich wurden unter anderem in Khatib (1986) vorgestellt. Darüber hinaus werden ähnliche Techniken auch zur Kollisionserkennung in der Computergrafik verwendet (Schneider & Eberly, 2003).

Eine Weiterführung der Pfadplanung für einzelne Roboter stellt die Auslegung gesamter Roboterzellen dar, wofür ebenfalls unterschiedliche Ansätze bestehen. So wird in Lüth (1992) hierzu ein automatisierter Prozess vorgestellt. Unter Vermeidung von Kollisionen werden hier die Position eines Roboters in einer Zelle sowie die gesamte Zelle, unter anderem hinsichtlich der minimalen Länge des Roboterpfades, optimiert.

Darüber hinaus existieren bei Verwendung autonomer Robotersysteme Möglichkeiten zur echtzeitfähigen Pfadplanung wie beispielsweise in Lüth, et al. (1995) vorgestellt. Zunächst wird hier global die Roboterzelle in der Anordnung ihrer unterschiedlichen Komponenten optimal konfiguriert. Daraufhin werden zyklisch und in Echtzeit

während der Roboterbewegung die notwendigen Pfadabschnitte zur Erreichung der Zielposition berechnet. Zusätzlich werden die Vermeidung von Kollisionen sowie eine nach Möglichkeit gleich bleibende Fahrtrichtung der bewegten Robotersysteme berücksichtigt.

## 2.2 Baukastensysteme zur Roboterentwicklung

Im Bereich der Forschung werden Roboter für spezialisierte Aufgaben benötigt. Da Standardroboter oft nicht die gewünschte Aufgabe erfüllen können, werden hier individuelle Roboter eingesetzt. Um diese möglichst schnell und effizient entwickeln zu können, werden hierzu Baukastensysteme verwendet. Mit deren Hilfe können speziell an die vorliegende Anwendung angepasste Roboter entwickelt werden.

Die Baukästen umfassen, wie beispielsweise in Wampler (2007), eine vordefinierte Anzahl an Elementen, welche in einer Bibliothek hinterlegt sind. Zu den Elementen zählen rotatorische, prismatische, zylindrische, planare oder auch Schraubengelenke. Diese werden, wie auch in Gong, et al. (2007), zur Entwicklung von Kinematiken miteinander kombiniert.

Kim und Khosla (1993) verwenden einen Baukasten vordefinierter Elemente zur Entwicklung eines angepassten Roboters für die Raumfahrt. Dabei berücksichtigen sie die Bereiche des Kinematik Designs sowie der Ansteuerung. Der aus Einzelementen zusammengesetzte Roboter wurde unter Berücksichtigung von Eigenschaften wie der Erreichbarkeit von Positionen, der Gelenklimits, oder auch Hindernissen im Arbeitsraum, Abständen von Singularitäten sowie auftretenden Gelenkmomenten erstellt. Zur Verbesserung der Aufgabenerfüllung werden die Designvariablen, wie beispielsweise der Freiheitsgrad oder weitere Eigenschaften der Kinematik (Lenkerlängen, Gelenkart etc.), in einem Optimierungsprozess variiert.

Darüber hinaus sind weitere Forschergruppen im Bereich der Entwicklung von Robotersystemen mittels mathematisch abgebildeten Baukästen tätig. Arbeiten hierzu wurden in Chen, et al. (1995), Chocron und Bidaud (1997) sowie Bi und Zhang (2001) vorgestellt. In allen Arbeiten werden Roboter aus Getriebegliedern unterschiedlicher Länge sowie aus Gelenken (rotatorisch, prismatisch, helixförmig, zylindrisch) dargestellt. Zur Referenzierung der Einzelemente wird z. B. eine binäre Codierung verwendet. Dabei kann diese auch auf Informationen über das geeignete Vorgehen beim Zusammenbau oder zur Kollisionsvermeidung verweisen. So können geeignete Kombinationen für den Zusammenbau priorisiert werden. Wurde in einem ersten Wurf bereits ein Roboter aus den Einzelementen erstellt, kann dieser mittels genetischer Algorithmen optimiert werden. Ein Bewertungskriterium kann, wie in Kapitel 2.1.4 bereits vorgestellt, ein aus einer Kombination unterschiedlicher Kriterien, wie beispielsweise der Bahnerfüllung, der Komplexität oder auch dem Gewicht des Aufbaus, berechneter Fitnesswert sein.

Neben diesen, rein rechnerisch abgebildeten, Baukästen existieren im Bereich der Forschung auch Ansätze, welche die Anfertigung von Prototypen vorsehen. Bei-

spiele hierfür sind die Systeme RMMS, TOMMS sowie Volksbot. Mit dem von Schmitz, et al. (1988) vorgestellten Baukasten RMMS kann aus Verbindungs- sowie Gelenkmodulen (rotatorisch, translatorisch) ein Roboter erstellt werden. Die einzelnen Bauteile enthalten neben integrierten Servoantrieben weitere Komponenten wie Sensoren, Signal- und Versorgungsleitungen etc. Der erstellte Roboter kann über eine Kommunikationsschnittstelle (Bussystem) mit Hilfe einer Pfadplanung sowie seiner Rückwärtskinematik aktuiert werden. Das Baukastensystem TOMMS (Matsumaru, 1995) zielt darauf ab, bei geringen Kosten mittels standardisierter Elemente Roboter zu erstellen. In dem Baukasten sind nur rotatorische Gelenke, welche die gängigste Gelenkart darstellen, enthalten (Abbildung 2.6). Der Zusammenbau wurde durch die begrenzte Anzahl an Gelenken und Lenkern sowie einfache Operationen benutzerfreundlich gestaltet. Der Antrieb der erstellten Roboter erfolgt mittels DC-Motoren. Mit Volksbot (Wisspeintner, et al., 2006) wird ebenfalls ein Baukastensystem zur Anfertigung aktuierter Roboterprototypen aus Standardelementen vorgestellt. Ziel hierbei ist, Roboter skalierbar, kostengünstig sowie stabil aufzubauen. Ihre Leistungsfähigkeit soll über der existierender Baukästen wie Lego Mindstorms (The LEGO Group), Fischertechnik Mobile Robots (fischerwerke GmbH & Co. KG), Tetrrix (wonderbits Dr. Kraetzschmar & Simon GbR) angesiedelt sein. Neben den vorhandenen Hardwareelementen wird eine Softwareumgebung zur Programmierung der Steuerung angeboten.

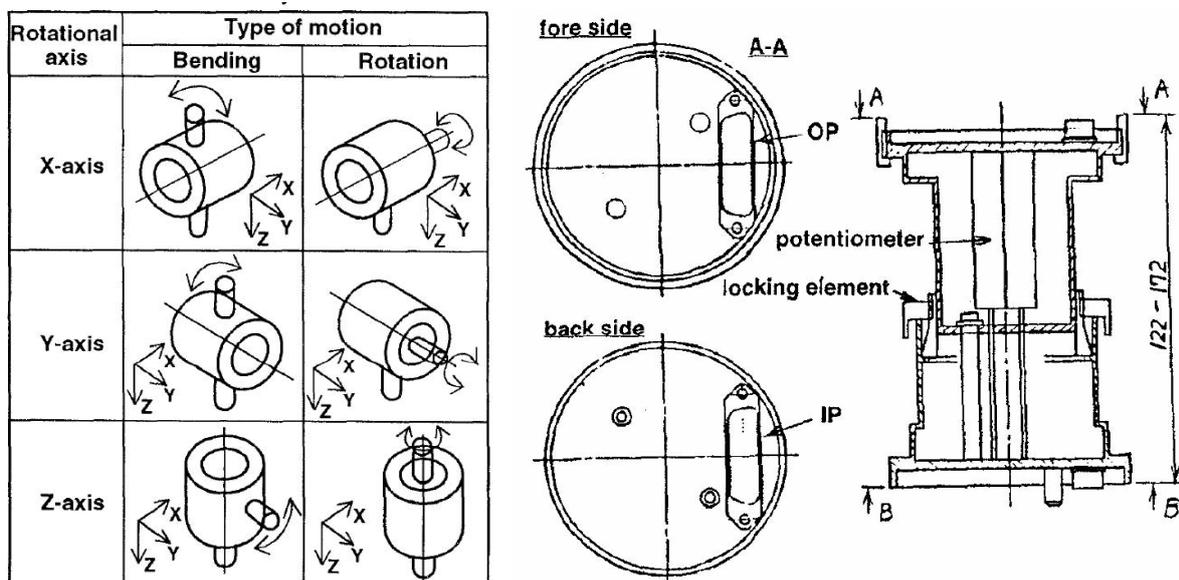


Abbildung 2.6: Roboterbaukastensystem TOMMS: Katalog verfügbarer Drehgelenkskombinationen sowie praktische Ausführung eines Verbindungsmoduls mit Elektronikkomponenten (Entnommen aus: Matsumaru, 1995).

Im Bereich der Roboterbaukästen sind auch bereits kommerzielle Systeme wie die Power Cubes (Schunk GmbH & Co. KG), die Molecubes (Festo AG & Co. KG) sowie das System Robolink (Igus GmbH) erhältlich. Diese industrietauglichen Systeme wurden bereits in Forschungsarbeiten näher betrachtet, wie beispielsweise bei der Untersuchung der Power Cubes in Smith und Christensen (2007). Vorarbeiten zu den Molecubes wurden unter anderem in Studer und Lipson (2006) durchgeführt.

Bei näherer Betrachtung können die materiellen Baukastensysteme in zwei Gruppen unterteilt werden. So werden einerseits standardisierte Baukästen mit geringer Teileanzahl wie die Molecubes (Festo AG & Co. KG) oder Power Cubes (Schunk GmbH & Co. KG) angeboten, welche eine wenig komplexe Montage ermöglichen. Der Funktionsumfang der Roboter, die Professionalität der Bauteile sowie der Produktcharakter der fertigen Prototypen sind sehr hoch. Andererseits sind aber auch die genannten, meist in der Spielzeugindustrie anzutreffenden, maximalflexiblen Baukästen mit hoher Teileanzahl wie die Fischertechnik Mobile Robots (fischerwerke GmbH & Co. KG) verfügbar. Diese bieten ein hohes Maß an Flexibilität, welches sich auch anhand der Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten zur Anbindung der Komponenten untereinander zeigt.

Eine Weiterführung der modularen Roboterbaukästen ist deren Anwendung für selbst-rekonfigurierbare Roboter. Ein Beispiel hierzu wird in Murata, et al. (2000) vorgestellt. Mit Hilfe dieses Baukastens können Roboter aus autonomen Standard-Komponenten zusammengestellt werden. Diese besitzen die Fähigkeit, sich autonom mittels der integrierten Steuerung und der Servomotoren selbst zu verändern und an aktuelle Umweltbedingungen anzupassen. Ähnliche Ansätze werden meist unter Verwendung von RP-Elementen realisiert und werden daher in Kapitel 2.5 bei der Vorstellung der Verwendung von Rapid Prototyping in der Roboterentwicklung vorgestellt.

## **2.3 Darstellung des Entwicklungsergebnisses**

Am Ende des Entwicklungsprozesses für Mechanismen und Roboter hat die Ausgabe des Ergebnisses zu erfolgen. Diese kann anhand der Daten der Kinematik (Elementanzahl, Elementarten, geometrische Parameter etc.) erfolgen, welche in Tabellen oder Graphen ausgegeben werden. Nachfolgend wird auf die für die vorliegende Arbeit relevanten Ausgabemöglichkeiten näher eingegangen. Diese sind zum einen die anschauliche Ausgabe von Geometriedaten, zum anderen die Erstellung eines geeigneten Programmcodes zur Ansteuerung der entwickelten Kinematiken.

### **2.3.1 Kinematikdarstellung anhand Geometriedaten**

Zur Veranschaulichung des Entwicklungsergebnisses besitzen einige der Entwicklungswerkzeuge eine Schnittstelle zur Ausgabe von CAD-Daten. So wird in Rankers (2002) bei der Vorstellung der Kinematikentwicklungssoftware SAM neben der Möglichkeit zur zweidimensionalen Visualisierung des entwickelten Systems und seines Umfelds, eine Möglichkeit zum Im- und Export von DXF-Daten aufgezeigt. Diese können in 2D-CAD-Systemen erstellt und verwendet werden. Weiterhin ist eine Animation der entwickelten Getriebe in Form des Exports von AVI-Videos möglich. Die Software SphinxCAM-Pro/E, welche in Laroche, et al. (2006) vorgestellt wurde, beschäftigt sich mit der Entwicklung sphärischer Viergelenke. Das Ergebnis dieser Maßsynthese kann in Form 3-dimensionaler CAD-Daten mittels der Software Pro/E angezeigt werden. Die Daten können aufgrund ihrer Detailtiefe zur Darstellung des

prinzipiellen Aufbau der Kinematik, nicht aber für die konkrete Umsetzung in einem Prototyp verwendet werden (Abbildung 2.7).

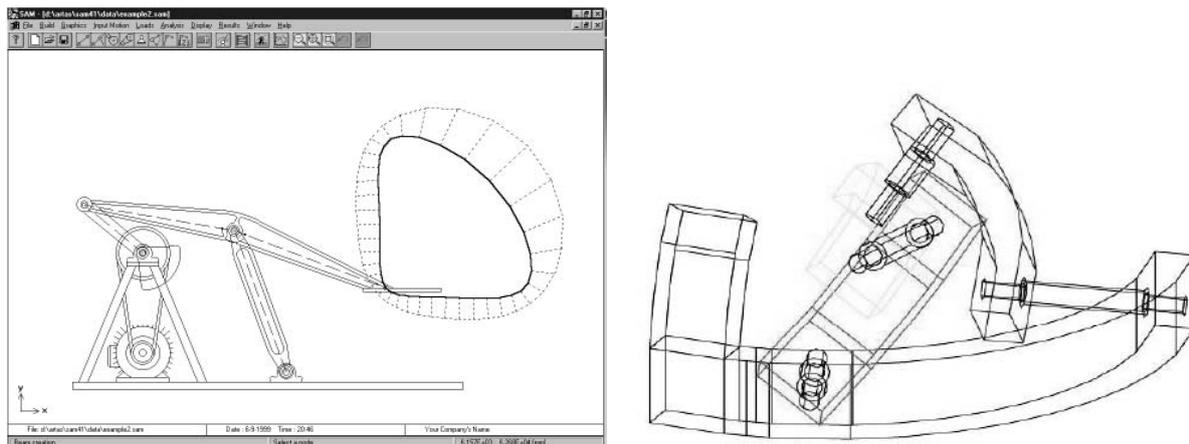


Abbildung 2.7: Zweidimensionale Ausgabe der Vorgabe- und Ergebnisdaten mittels der Kinematiksoftware SAM sowie Darstellung anhand eines 3D-Modells mittels SphinxCAM-Pro/E (Entnommen aus: Rankers, 2002 sowie Larochelle, et al. 2006).

Von Clark und Lin (2007) wird die Synthese von Kinematiken mit Hilfe der Programmierumgebung von Matlab<sup>®</sup> durchgeführt. Als Vorgabe für den Syntheseprozess können Eigenschaften eines bereits definierten Gesamtsystems aus der CAD-Software Pro/E importiert werden. Wichtige Vorgabeparameter sind hier zum Beispiel die Längen der einzelnen Glieder, die Achsverschränkungen, das Gelenkoffset sowie die möglichen Gelenkwinkel. Als Ergebnis können unter anderem die über die Laufzeit auftretenden Gelenkwinkel exportiert werden. Hiermit kann nachfolgend in Pro/Mechanica eine Simulation des Roboters realisiert werden.

Neben diesen Ausgabearten besteht die Möglichkeit einer materiellen Ausgabe von Ergebniskinematiken mittels Prototypen, welche beispielsweise in Lipson und Pollack (2000) eingesetzt wird. Hierauf wird in den nachfolgenden Kapiteln (2.3.2 bzw. 2.5) in Verbindung mit Rapid-Prototyping-Prozessen näher eingegangen.

### 2.3.2 Ansteuerungsausgabe und Veranschaulichung der Kinetik entwickelter Systeme

Aus der in Kapitel 2.1.5 vorgestellten Pfadplanung gehen die Verläufe der Gelenkwinkel der Antriebe der neu entwickelten Kinematik zur Erfüllung einer Aufgabe hervor. Einen weiteren, speziell für robotische Anwendungen interessanten Aspekt stellt jedoch die direkte Ausgabe von Daten zur Ansteuerung des entwickelten Roboters dar. Soll diese realisiert werden, müssen weitere Details, wie die Motoreigenschaften mit einbezogen werden. So wird in Desa und Roth (1985) ein Verfahren zur Erstellung der optimalen Ansteuerungsdaten (bewertet durch einen performance index) für einen Manipulator, zur Lösung eines track-following-Problems, vorgestellt. Herausforderungen hierbei sind in der Ungenauigkeit der Steuerparameter, der Modellierung des Systems sowie in auftretenden nichtlinearen Effekten zu finden.

Asada und Slotine (1986) betrachteten hierzu neben der reinen Kinematik (Bewegung) von Robotersystemen zusätzlich die auftretenden Kräfte sowie die, sich durch die vorhandenen Massen der Kinematik ergebenden, dynamischen Effekte. Zusätzlich wird auch die Ansteuerung des entwickelten Roboters im Kontakt mit seiner Umgebung berücksichtigt (compliant motion control).

In Corke (1996) wurde ein in Matlab<sup>®</sup> integriertes Programmpaket zur Analyse und Simulation von Robotern für Forschungs- und Ausbildungszwecke vorgestellt. Mit diesem können die Verläufe der benötigten Gelenkwinkel sowie die kinetischen Daten (Motormomente etc.) vorab definierter Roboter während der Bewegung am Rechner dargestellt werden. Diese Daten können daraufhin zur Aktuierung der Roboter verwendet werden.

Aus dem Bereich der Fabrikplanung sind ähnliche Vorgehensweisen, unter Anderem zur Darstellung und Überprüfung der Ansteuerung sowie der Kinetik eines entwickelten Systems in seinem Umfeld, bekannt (Reinhart & Spitzweg, 2007). Hierbei wird ein physikalisches Modell des Systems zur Durchführung einer beschränkungs-basierten Starrkörpersimulation verwendet. Mittels der in einem integrierten Entwicklungs- und Simulationsarbeitsplatz integrierten Funktionalitäten kann eine virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden. So können Fehler in der Steuerung frühzeitig erkannt werden.

Eine Methode zur automatischen Geometrie- und Ansteuerungserstellung mit Hilfe evolutionärer Algorithmen wird in Hornby, et al. (2001) vorgestellt. Mit dieser wird das Entwicklungsvorgehen vom theoretisch erstellten Roboter zum Prototyp vereinfacht sowie dessen Dauer verkürzt. Zur Veranschaulichung werden Prototypen entwickelter Systeme mit Hilfe von Servomotoren mit einem Bewegungsbereich  $\pm 60^\circ$  aktu-iert. Die erstellten Roboter und Kinematiken werden bei dieser Ausgabeform quasi-statisch simuliert, das heißt die Winkel der Antriebe werden in kleinen Schritten entsprechend der Ansteuerung variiert (Abbildung 2.8).

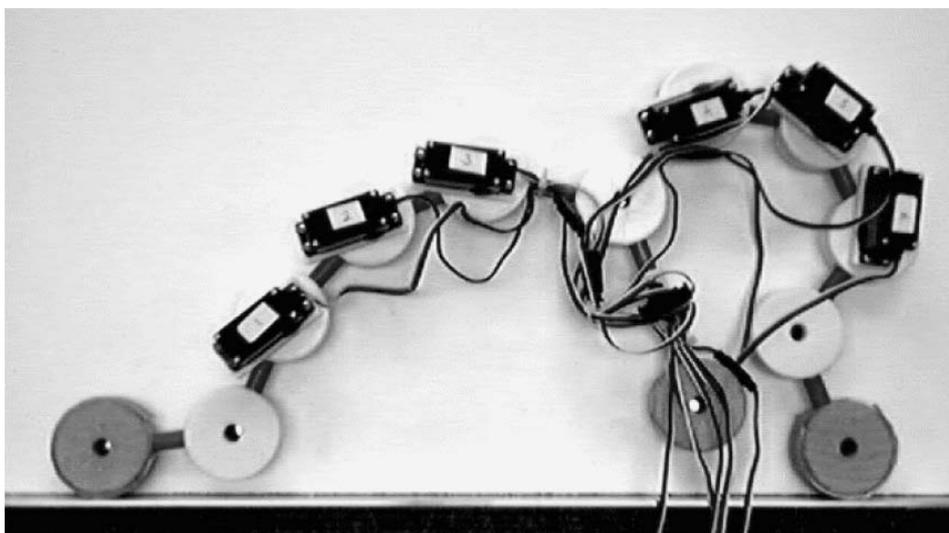


Abbildung 2.8: Aufbau eines Roboter-Prototyps anhand einfacher, aktuierter Elemente (Entnommen aus: Hornby, et al., 2001).

## 2.4 Marktverfügbare Verfahren der generativen Fertigung

Ein von C. W. Hull im Jahre 1986 veröffentlichtes Patent (Hull, 1986) kennzeichnet den Beginn der generativen Fertigungsverfahren. In dem Patent wurde die schichtweise Herstellung von 3D-Geometrien aus einzelnen Schnittebenen beschrieben. Zu deren Aufbau war ein flüssiges Medium, welches während der Verarbeitung seinen physikalischen Zustand ändert (synergetische Stimulation), vorgesehen. Zur Verfestigung der laminar aufgebauten Struktur wird die Verwendung einer fixierenden Strahlung vorgesehen. Die für die Steuerung der Strahlung notwendigen Daten werden an die Anlage mittels eines Computers übertragen (Abbildung 2.9).

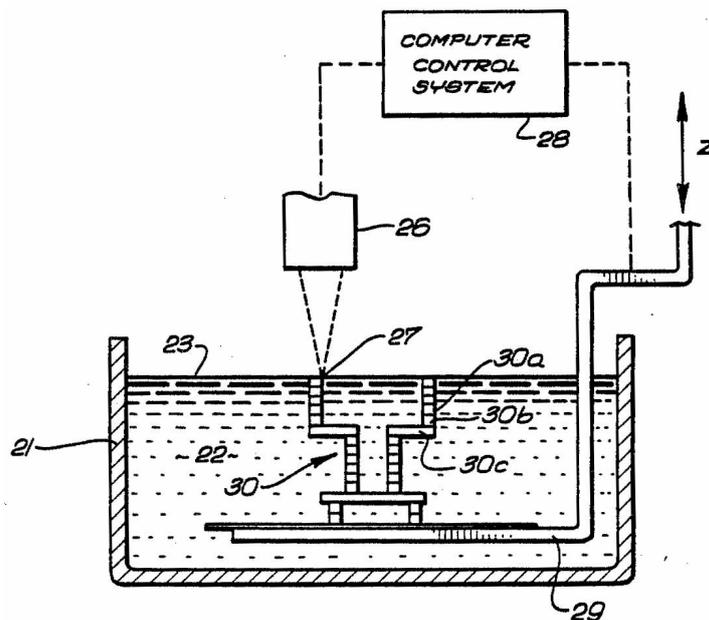


Abbildung 2.9: Aufbau einer Rapid-Prototyping-Anlage aus einem vertikal beweglichen Bau- raum, einer das Baumaterial verfestigenden Strahlung sowie der Rechner- ansteuerung (Entnommen aus: Hull, 1986).

Nach der Veröffentlichung des Patents von Hull wurde im Jahre 1987 durch das Un- ternehmen 3D Systems das erste Rapid-Prototyping-Gerät auf Basis der Stereolitho- graphie auf den Markt gebracht. Zunächst waren die Anlagen dazu gedacht, Ver- säumnisse des Prototypenbaus einzuholen. Heute werden Sie in allen Teilbereichen des Designprozesses verwendet (Grimm, 2004).

Der in der Folge aufkommende Begriff des Rapid Prototyping beschränkte sich je- doch nicht nur auf das Stereolithographie-Verfahren. So wurden alle additiven Ferti- gungsverfahren, welche in Kapitel 2.4.2 vorgestellt werden, als RP-Verfahren im ei- gentlichen Sinne bezeichnet. Heute wird der Begriff jedoch zumeist für alle Prozesse verwendet, mit welchen Prototypen schneller als zuvor hergestellt werden können (Grimm, 2004). Nachfolgend wird zunächst näher auf die Verwendungszwecke der generativ erzeugten Modelle sowie die softwaretechnischen Grundlagen eingegan- gen.

### **2.4.1 Anwendung generativ erstellter Modelle und softwaretechnische Grundlagen**

Mit generativen Fertigungsverfahren erstellte Modelle werden für ein breites Spektrum von Aufgaben eingesetzt. In Abhängigkeit hiervon werden sie den drei Bereichen Rapid Prototyping, Rapid Tooling sowie Rapid Manufacturing zugeordnet.

Die Fertigung von Bauteilen mittels generativer Fertigungsverfahren erfolgt ausschließlich durch Zugabe von Material. Die realisierte schnelle („rapid“) Prototypenerstellung ist dabei stets differenziert, im Hinblick auf das Einsatzgebiet der Produkte (Kleinserien, Werkzeuge etc.), sowie im Vergleich mit anderen Produktionsprozessen zu betrachten (Gebhardt, 2007). Der mit der Durchführung eines generativen Fertigungsprozesses verfolgte Zweck kann, in Abhängigkeit von der beabsichtigten Anwendung, weiter untergliedert werden. Er kann den Bereichen solid imaging (Erstellung von Anschauungsmodellen), functional prototyping (Aufbau von Funktionsprototypen) sowie Rapid Tooling und Direct Manufacturing zugeordnet werden. Dem Bereich des Rapid Prototyping werden zwei Arten von Modellen zugeordnet. Ein Anschauungsmodell (solid image) stellt ein einfaches, die Form und Eigenschaften einer Komponente anzeigendes, Modell dar. Ein Funktionsprototyp (functional prototype) hingegen besitzt darüber hinaus bereits eine oder mehrere mechanisch-technologische Eigenschaften der endgültigen Serienkomponente. Mittels Rapid Tooling werden Werkzeuge zur Herstellung von Prototypen, Vorserien oder auch Urmodelle für den Werkzeugbau angefertigt. Beim Rapid Manufacturing besteht bereits Seriencharakter. Hier werden direkt Bauteile in der gewünschten Stückzahl oder Fertigungswerkzeuge zur Bereitstellung der gewünschten Anzahl an Komponenten hergestellt (Gebhardt, 2007).

Die Produktmodelle des Rapid Prototyping können, nach einer Richtlinie des VDID (Verband Deutscher Industriedesigner) weiterhin verschiedenen Gruppen zugeordnet werden. Diese differieren jeweils in ihrem Abstraktionsgrad (nachfolgend abfallend), sowie der Detaillierung und dem Umfang ihrer Funktionalität (nachfolgend ansteigend):

- Proportionsmodelle (proportional model),
- Ergonomiemodelle (ergonomic model),
- Designmodelle (styling model),
- Funktionsmodelle (functional model),
- Prototypen (prototype) und Muster (sample), (Gebhardt, 2007).

Durch die Verwendung von RP-Modellen zu entwickelnder Systeme und deren Erstellung innerhalb kürzester Zeit wird die Überprüfung der Tauglichkeit des Konzepts (proof of concept) beschleunigt sowie eine erhöhte Anzahl an Untersuchungen in gleich bleibender Zeit ermöglicht. Hierzu zählen Marketing-, Ergonomie- und Form-

schlüssigkeitsuntersuchungen. Darüber hinaus werden taktile Untersuchungen, Aspekte der Montierbarkeit, der Zuverlässigkeit oder auch eine Überprüfung der Kinetik möglich (Chua, et al., 1999). Einige dieser Untersuchungen sind mit virtuellen Prototypen eventuell auch zeitsparender durchzuführen, jedoch ist hierzu Erfahrung notwendig. Zusätzlich muss die Ausarbeitung des Konzepts bereits weit fortgeschritten sein (Chua, et al., 1999).

Die eingesetzten Modellarten stellen unterschiedliche Anforderungen an die gefertigten Prototypen. Deren Erfüllung ist von den Kenngrößen und Eigenschaften der Fertigungsprozesse abhängig. Die wichtigsten hierbei sind die Modellgenauigkeit sowie die Oberflächengenauigkeit (Gebhardt, 2003). Einen weiteren Einfluss stellt die bei RP-Modellen im Rahmen der Modelltrocknung auftretende Schrumpfung dar. Zudem ist eine frühere Materialermüdung zu beachten (Chua, et al., 1999). Viele dieser Eigenschaften hängen, neben der verwendeten Anlage, dem Schichtgenerierungsprinzip sowie dem verwendeten Material vor allem vom Fertigungsprozess ab. Dieser besteht für gewöhnlich aus Vorverarbeitung (preprocessing), dem generativen Prozess selbst sowie der Nachbearbeitung (postprocessing). Daneben ist der Faktor Mensch, welcher durch Konstruktion, Handhabung, etc. Einfluss ausübt, nicht zu vernachlässigen (Gebhardt, 2003).

Alle generativen Fertigungsverfahren benötigen Schnittstellen zur Übertragung der erstellten geometrischen Daten aus der CAD-Konstruktion zur Weiterverarbeitung im Fertigungsprozess. Hierfür stehen unterschiedliche Datenformate wie HP/GL (2D-Schnitte), CT Data, SLC, CLI-File, RPI-File oder auch LEAF-Files zur Verfügung (Chua, et al., 2003). Das Standard-Datenformat stellt jedoch das STL-Format (standard triangle language, stereolithography language, stereolithography tessellation language) dar (Gibson, 2002). Von diesem stehen sowohl eine binäre als auch eine im ASCII-Format ausgedrückte Variante zur Verfügung. Bei Verwendung dieses Datenformats wird die Kontur konstruktiv, mittels eines 3D-Modellierers, erzeugter Volumenmodelle durch Dreiecksstrukturen angenähert. Jeweils die drei Eckpunkte der Dreiecke sowie eine hierzu gehörende Flächennormale (Normalenrichtung deutet vom Körper nach außen) werden in einer Datei abgelegt (3D Systems, 1988). Abbildung 2.10 zeigt beispielhaft den Aufbau einer STL-Datei im ASCII-Format.

```

solid MIMED Kinematics STL
  facet normal 0.000000e+000 3.420201e-001 -9.396926e-001
    outer loop
      vertex 2.500000e+001 -8.550504e-001 2.349232e+000
      vertex 2.283864e+001 8.700135e+000 5.827035e+000
      vertex 0.000000e+000 -8.550504e-001 2.349232e+000
    end loop
  end facet
...
endsolid MIMED Kinematics STL

```

Abbildung 2.10: Aufbau einer STL-Datei im ASCII-Format.

Die Qualität der, mittels RP angefertigten, Bauteile ist in hohem Grade abhängig von der Abweichung der STL-Daten vom Originalbauteil. Diese beträgt zumeist zwischen 0,025 mm und 0,05 mm (Grimm, 2004). Darüber hinaus können die STL-Daten zusätzlich Fehler beinhalten. So können nach Leong, et al. (1996) Lücken im Modell (Risse, Löcher, Einstiche), entartete Flächen (z. B. bei Parallelität aller Flächen), durch Rundungsfehler überlappende Flächen oder topologisch vielfache Oberflächen wie zum Beispiel mehrfache Flächen pro Kante, Punkte in anderen Flächen oder gegeneinander aufeinander liegende Flächen auftreten (Abbildung 2.11). Diese Fehler können den weiteren Prozessablauf stören und müssen daher durch Reparaturmethoden behoben werden.

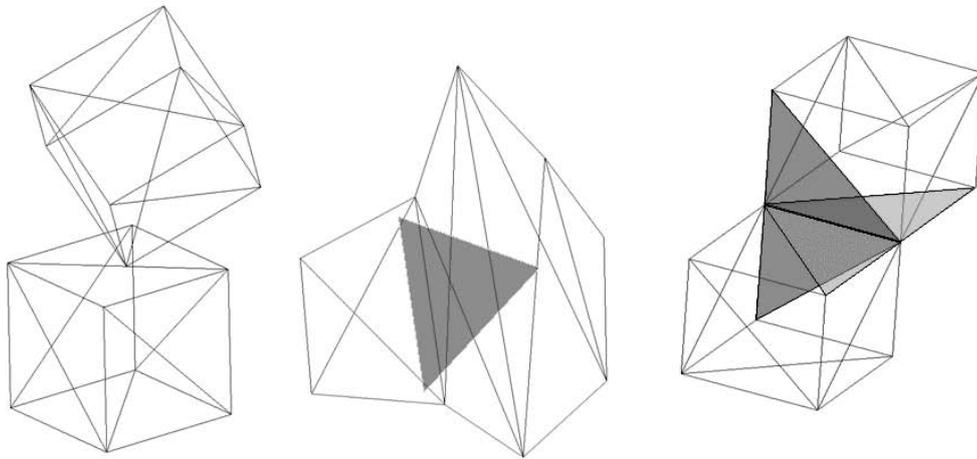


Abbildung 2.11: Mögliche Fehler von STL-Dateien: Dreieckspunkt in anderer Fläche, überlappende oder sich schneidende Flächen (Angelehnt an: Leong, et al., 1996).

## 2.4.2 Verfahren des Rapid Prototyping

Im Bereich der generativen Fertigung zur Erstellung von Prototypen existiert eine Vielzahl von Verfahren, welche sich vornehmlich durch den durchgeführten Bauprozess unterscheiden. Daneben werden zusätzlich mannigfaltige Ausgangsmaterialien und Bindungsmechanismen eingesetzt. All diesen Parameter beeinflussen die Eigenschaften des erzeugten Prototyps. Darüber hinaus spielen auch das Vorgehen bei der Materialverarbeitung, die verwendete Aktivierungsenergie sowie die nachfolgend durchgeführten Prozesse (Postprocessing) eine Rolle.

Aktuell werden industriell folgende RP-Verfahren eingesetzt (Hoyer, et al., 2006):

- 3D-Printing (3DP),
- Digital Light Processing (DLP),
- Fused Deposition Modeling (FDM) bzw. Fused Layer Modeling (FLM),
- Laminated Object Manufacturing (LOM) bzw. Layer Laminated Manufacturing (LLM),

- Multi-Jet Modeling (MJM) als Sonderform von FDM,
- Poly Jet Modeling (PJM),
- Selective Inhibition Sintering (SIS),
- Stereolithographie (SL, SLA, STL),
- Selective Laser Sintering (SLS) bzw. Generatives Laser Sintern (GLS),
- Selective Mask Sintering (SMS).

Eine Aufstellung der wichtigsten Kenngrößen dieser Fertigungsverfahren wie die erreichbare Genauigkeit und die Anlagenkosten ist in Tabelle 2.1 aufgezeigt. So ist zum Beispiel die höchste Genauigkeit bei Verwendung von DLP-Anlagen erreichbar, die geringsten Investitionskosten ergeben sich beim Einsatz von FDM/LOM-Anlagen.

Tabelle 2.1: Vergleich industriell verfügbarer RP-Verfahren: wichtigste Kenngrößen sowie Anlagenkosten (Datenquelle: Hoyer, et al., 2006); (\*): keine Angaben verfügbar.

	Ausgangs- material	Zustand des Materials	erreichbare Genauigkeit (mm)	Schichtdicke (mm) (dpi)	Anlagen- kosten (€)	Post- processing
3D-Printing (3DP)	Keramik, Gips, Stärke	Pulver	0.1	0.089 - 0.203	30,000	Reinigung, Imprägnierung/ Infiltration
Digital Light Processing (DLP)	Oligomere (Monomere und Füllstoff)	Flüssigkeit/ Paste	0.0245 - 0.061	0.015 - 0.15	55,000	Chemische Reinigung
Fused Deposition Modeling (FDM), Fused Layer Modeling (FLM)	Hochpolymere	Stränge/ Fäden	0.1	0.18	17,000	Reinigung
Laminated Object Manufacturing (LOM), Layer Laminated Manufacturing (LLM)	Hochpolymer- laminat	Folie	+/- 0.2	0.1	15,000	Entfernen von Reststücken, Finishen
Multi-Jet Modeling (MJM), Sonderform von FLM	Hochpolymere	Stränge/ Blöcke	0.0387	0.032	53,000	Reinigung
Poly Jet Modeling (PJM)	Polymer- gemische	Flüssigkeit/ Brei	0.042	0.016	120,000	Reinigung mittels Wasserstrahl
Selective Inhibition Sintering (SIS)	Hochpolymere, Metall- legierungen, Keramiken	Pulver	---*	---*	---*	Reinigung mittels Druckluft
Stereolithographie (SL, SLA, STL)	Oligomere (Monomere und Füllstoff)	Flüssigkeit/ Paste	0.01	0.01	25,000	Chemische Reinigung, Nachvernetzen/ härten
Selective Laser Sintering (SLS), Generatives Laser Sintern (GLS)	Hochpolymere, Metall- legierungen, Keramiken	Pulver	+/- 0.1	0.1	280,000	Reinigung mittels Druckluft
Selective Mask Sintering (SMS)	Hochpolymere, Metall- legierungen, Keramiken	Pulver	0.085	0.05	100,000	Reinigung mittels Druckluft

In der vorliegenden Arbeit wird das Verfahren des 3D-Printing (3D-Druck) zur Anfertigung von Robotermodellen verwendet. Dieses Verfahren bietet den Vorteil eines schnellen, nahezu bürotauglichen Fertigungsprozesses. Durch eine Anpassung der technologischen Prozessparameter (siehe Kapitel 6.2.1) lassen sich die hier vorgestellten Methoden jedoch auch an die Verwendung weiterer RP-Fertigungsverfahren anpassen.

Das Ausgangsmaterial des 3D-Printing bildet Keramik-, Gips- bzw. Stärkepulver. Dieses befindet sich zunächst in einem Vorratsbehälter (feed) und wird von dort mittels einer Walze schichtweise in den Bauraum (build) befördert. Nach jedem Schichtauftrag verfährt ein in der horizontalen  $x/y$ -Ebene beweglicher Druckkopf über den Baubereich. Dort bringt er partiell, in Abhängigkeit von der im aktuellen Bauteilquerschnitt existierenden 2D-Kontur, flüssiges, meist wasserbasiertes Bindemittel auf (Gebhardt, 2007). Dieses verfestigt das pulverförmige Ausgangsmaterial. Hierauf folgt ein vertikales Verschieben des Baubereichs nach unten. Beginnend mit einem erneuten Auftrag des pulverförmigen Ausgangsmaterials wiederholt sich dieser Bauprozess bis zur Fertigstellung des Modells (Abbildung 2.12).

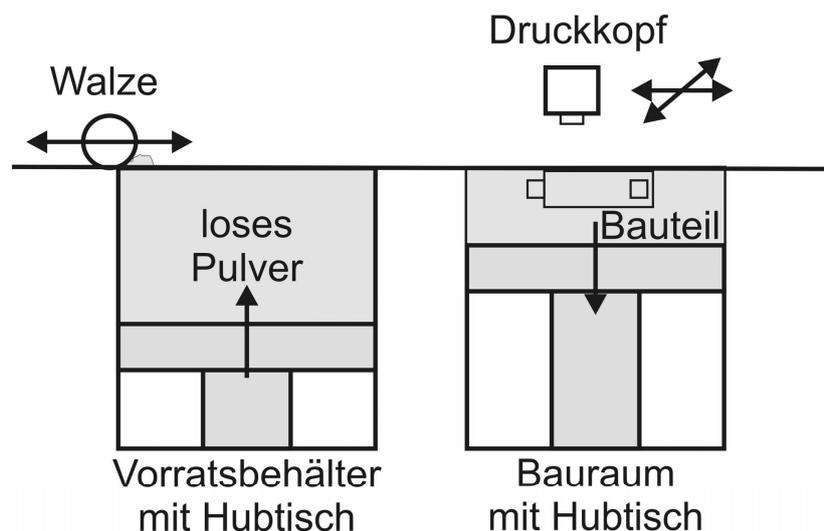


Abbildung 2.12: Funktionsweise des 3D-Druck-Verfahrens: Aus dem Vorratsbehälter wird schichtweise mittels der Walze loses Pulver in den Bauraum verschoben. Dabei bewegt sich, im Rahmen der Auflösung, der Hubtisch des Vorratsbehälters jeweils nach oben. Der Bauraum-Hubtisch wird analog nach unten bewegt. Mittels des in  $x$ - sowie  $y$ -Richtung beweglichen Druckkopfes wird Binder in das Pulver gedruckt. Hierdurch wird dieses partiell zu einem Bauteil verklebt.

Durch die flächige, vollkommene Füllung des Bauraumes sind beim 3D-Druck Stützstrukturen zumeist nicht notwendig. Nach der Entnahme des fertig gedruckten Bauteils aus dem Bauraum sind, aufgrund der bis dato geringen Festigkeit und der Porosität des Ausgangsmaterials, weitere Prozessschritte notwendig. Dieses Postprocessing besteht aus der Infiltration des Bauteils mit z. B. Epoxydharz oder ähnlichen Prozessen. Die Bauteilfestigkeit entspricht hierauf in etwa der Festigkeit des Infiltrats. Die erreichbare Oberflächengenauigkeit hängt von der Auflösung der Anlage sowie

der Orientierung und Platzierung des Bauteils in der Anlage ab. Daneben spielen die verwendete Stützstruktur, die aus dem slicing-Prozess (Bilden von Ebenenschnitten) resultierende Genauigkeit der digitalen Daten sowie der Aufbau der Fertigungsdatei (build file creation) eine Rolle. Bei einer Druckerauflösung von 600 dpi ist eine Bauteilgenauigkeit von ca. 0,1 mm – 0,15 mm möglich (Grimm, 2004). Weiterhin sind, in Abhängigkeit von gewünschter Oberflächenqualität und -genauigkeit der Funktionsflächen, zusätzliche Postprocessing-Schritte notwendig. Hierzu kann eine mechanische Bearbeitung der Oberflächen zählen. Daneben können bereits während der Fertigung bekannte, systembedingte Fertigungsungenauigkeiten vermieden werden. So sollte während der Fertigung die oben bereits erwähnte Ausrichtung der Bauteile im Bauraum des 3D-Druckers beachtet werden, um eine Treppenbildung, den Stufeneffekt (Gebhardt, 2007), zu vermeiden. Weiterhin wird von Stopp, et al. (2008) eine Routine zur Kalibrierung eines 3D-Druckers vor der Bauteilfertigung vorgestellt. Durch die hierbei durchgeführte Ermittlung der, während der Fertigung auftretenden, systembedingten, Form- und Maßabweichungen kann die Ansteuerung der RP-Anlage modifiziert und damit die Druckgenauigkeit gesteigert werden.

Neben der alleinigen Anfertigung von RP-Modellen aus z. B. Gips können zur Erhöhung der Funktionalitäten des Prototyps zusätzliche Komponenten (Lager, Getriebe, etc.) eingebettet werden. Die dabei verwendeten Methoden sind aufgrund der Ähnlichkeit der RP-Prozessabläufe zumeist universell für mehrere Verfahren einsetzbar. Hierzu stellt Liao, et al. (2007) eine Möglichkeit zur Komponentenintegration bei Verwendung von Laminated Object Manufacturing (LOM) Prozessen vor. Die Herausforderungen bei der Integration sind jeweils die Anpassung der RP-Bauteile an die eingefügten Komponenten sowie die Sicherstellung der Montierbarkeit. Dabei müssen z. B. Überschneidungen und Kollisionen vermieden werden. Um dies zu erreichen werden die in den Normalenvektoren der STL-Modelle enthaltenen Richtungsinformationen zur Positionierung und Einbindung der Elemente verwendet.

In Cham, et al. (1999) werden die an der Stanford University durchgeführten Untersuchungen zur Integration von Komponenten in Prototypen, welche mittels SDM-Verfahren (Shape Deposition Manufacturing) hergestellt wurden, vorgestellt. Bei Anwendung dieser, für die Fertigung mittels 3D-Druck nicht unmittelbar verwendbaren, Methode werden die zu integrierenden Sensoren, Aktoren oder mechanischen Komponenten bereits während der Fertigung direkt in den Bauraum eingelegt. Die Herstellung der notwendigen Verbindung zwischen den einzelnen Schichten, die Kontrolle der Materialeigenschaften, die Oberflächengüte sowie die Schrumpfung stellen dabei die größten Herausforderungen dar. Um diese zu lösen, müssen eine exakte Positionierung der Einlege-teile, die Einhaltung von Einbautoleranzen, sowie der Erhalt der Funktionalität der eingelegten Komponenten durch Schutz vor Verklebung beachtet werden. Weitere Untersuchungen in diesem Bereich wurden unter anderem von Binnard und Cutkosky (1998) sowie Kataria und Rosen (2001) vorgenommen. In letzterer Veröffentlichung wird speziell auf die Spaltmaße zwischen unterschiedlichen Elementen sowie auf Gestaltungsrichtlinien, welche während der Fertigung zu be-

rücksichtigen sind, eingegangen. Dazu zählen zum Beispiel die Ausprägung von Stützstrukturen sowie Kabeldurchführungen.

## 2.5 Rapid Prototyping in der Kinematikentwicklung

Für den industriellen Einsatz mittels RP-Prozessen gefertigter Prototypen werden in Gebhardt (2007) und Liou (2008) Beispiele aufgezeigt. So wurden Modelle eines Cabrioverteds zur interdisziplinären Kommunikation sowie zur Konzeptabsicherung eingesetzt. Zur Unterstützung des Designprozesses werden in Maletsky und Hale (2003) funktionale Komponenten unterschiedlicher Entwicklungen mittels RP-Prozessen zur Formabstimmung sowie für Passgenauigkeits- und Funktionsuntersuchungen (form, fit & function) hergestellt. Dies führte in diesem Arbeitsbereich zu verringerter Konstruktionszeit sowie zu einer Verbesserung der Qualität des endgültigen Designs. Diese Vorteile erwachsen nicht zuletzt aus der direkten Rückmeldung über die Modelleigenschaften wie Reibung oder Gewichtskraft, welche in Lipson (2007) beispielsweise bei der Abbildung von Getriebemodellen erzielt wird.

Die ersten Untersuchungen zur Unterstützung der Kinematikentwicklung mittels RP-Prototypen wurden unter anderem in Alam, et al. (1999) vorgenommen. Dabei wurden eine Anfertigung kinematischer Elemente (Drehgelenke, sphärische Gelenke, prismatische Gelenke) sowie deren Kombination zu Prototypen durchgeführt. Eine prototypische Darstellung der Ergebnisse einer Kinematikoptimierung wurde in Funes, et al. (2000) unter Verwendung eines einfachen Baukastens durchgeführt. Durch den Aufbau unterschiedlicher Strukturen mit Hilfe parametrierter Bauelemente (marktverfügbare Lego<sup>®</sup>-Bausteine) wurde eine Möglichkeit zur Untersuchung der Strukturen hinsichtlich ihrer Festigkeit gegen Graviationseinwirkung geschaffen.

Mit der Verbesserung der Bauteilqualität halten RP-Prozesse vermehrt Einzug in der Roboterentwicklung. Beispiele hierfür sind bei Betrachtung der an der Brandeis University durchgeführten Untersuchungen zu finden (Lipson & Pollack, 2000). Nach einer automatischen Erzeugung robotischer Lebensformen (robotic lifeforms) mittels evolutionärer Algorithmen folgt hier deren Darstellung mittels automatisiert aufgebauter RP-Modelle (Abbildung 2.13).

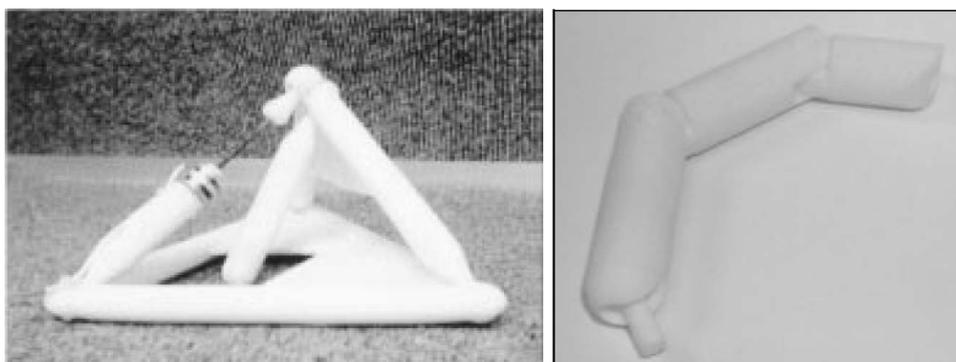


Abbildung 2.13: Darstellung eines Mechanismus/Roboters sowie eines robotischen Fingers mittels Rapid-Prototyping-Verfahren (Entnommen aus: Lipson & Pollack, 2000 sowie Won, et al., 2000).

Weitere Anwendungen der Verwendung von RP-Prototypen zur Unterstützung der Kinematikentwicklung werden in Won, et al. (2000) sowie Mavroidis, et al. (2001) vorgestellt. Hintergrund ist hier jeweils die reine Abbildung der Kinematiken zum Zwecke deren Analyse. Auf Basis von CAD-Konstruktionen werden die Prototypen aus einzelnen, mittels RP-Verfahren gefertigten, Roboterelementen (Gelenken, Lenkern etc.) erstellt. Nach der Montage der Gesamtsysteme können deren kinematische Eigenschaften (Bewegungen), nicht jedoch die kinetischen (Dynamik), abgebildet werden. In Rajagopalan und Cutkosky (1998) sowie Rajagopalan und Cutkosky (1999) wird die Fertigung bereits montierter Mechanismen näher untersucht. Hierbei werden Untersuchungen hinsichtlich der einzuhaltenden Toleranzen sowie der Anfertigung der montierten Mechanismen in unterschiedlichen Gelenkstellungen betrachtet. Rein zur Visualisierung und „Erfahrung“ von Kinematiken nutzte Szydlowski (2001) von der University of Nebraska-Lincoln derartige RP-gestützte Fertigungsprozesse.

Laliberté, et al. (2001) von der Laval University in Quebec stellten die Fertigung physikalischer Prototypen von Robotern, unter anderem zur Senkung der Kosten der Prototypenerzeugung, vor. Die Modelle wurden an CAD-Systemen erzeugt, ausgeleitet (STL-Daten) und anschließend mittels einer FDM-Anlage gefertigt. In dem Artikel wird auch auf neue Designmöglichkeiten durch Verwendung der RP-Fertigung hingewiesen. Zugleich werden jedoch auftretende Einschränkungen hinsichtlich der Maßtoleranzen sowie der Oberflächenqualität genannt. Darüber hinaus wird auf grundlegende Richtlinien der RP-Fertigung, wie die geeignete Ausrichtung der Bauteile während der Fertigung in der RP-Anlage, sowie auftretende Elastizitäten hingewiesen. Neben der Anfertigung von Dreh-, Kardan-, Kugel-, Prismen- sowie Zylinderführungen und -gelenken wurden zusätzliche Bauelemente in das durch Pressverbindungen montierte Modell eingebracht. Weiterhin wurde eine Aktuierung der Mechanismen durchgeführt. Daher konnten die Bauteile bereits nicht mehr nur für Demonstrations- und Schulungsaufgaben, sondern auch für Experimente sowie Vorversuche angewendet werden.

Zur weiteren Veranschaulichung der neuen Designmöglichkeiten wird in De Laurentis, et al. (2002) der Aufbau eines nicht-montierbaren, robotischen Systems mit eingebetteten Komponenten vorgestellt. Mit Hilfe der durch SLS hergestellten Bauteile können unter anderem Gelenkbeschränkungen visualisiert, sowie Arbeitsräume evaluiert und Singularitäten erkannt werden. Herausforderungen bei der Fertigung der Modelle waren chemische Reaktionen der eingesetzten Komponenten mit dem Baumaterial sowie die Berücksichtigung von Toleranzen zwischen den Bauteilen. Alle Bauelemente wurden in ein Fahrzeugmodell (RP MOVE) integriert. In De Laurentis, et al. (2004) wird der Aufbau des obigen Modells mit den eingesetzten Bauteilen (Antriebe, Lager, Getriebe) vorgestellt. Daneben wurde jedoch auch das Ziel einer zukünftig automatisierten Entwicklung von Robotern in Aussicht gestellt, welche dann speziell hinsichtlich unterschiedlicher Ziele wie Kosten, Leistung etc. optimiert sein sollen. Beispiele komplett montiert gedruckter Kinematiken bietet der Beitrag von Ebert-Uphoff, et al. (2005) vom Georgia Institute of Technologie (Abbildung 2.14).

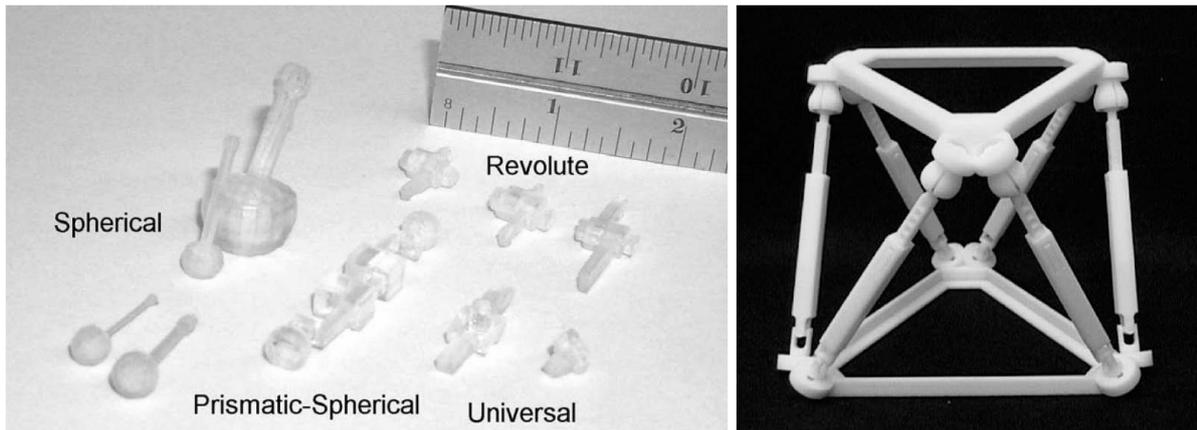


Abbildung 2.14: Rapid-Prototyping-Fertigung von Roboterelementen sowie montiert gefertigter Kinematikprototyp (Entnommen aus: De Laurentis, et al., 2002 sowie Ebert-Uphoff, et al., 2005).

Hornby und Pollack (2001) bringen die Erstellung von RP-Mechanismen und RP-Modellen in Verbindung mit einer vorangehenden Optimierungsroutine. In diesem Fall wurden die mechanische Struktur eines Tisches mittels evolutionärer Algorithmen optimiert und hieraus unterschiedliche Tischmodelle erzeugt. In Rieffel und Pollack (2005) wird ein System vorgestellt, welches während der Struktursynthese von Kinematiken auch deren spätere Montierbarkeit hinsichtlich sowohl Montagerichtung als auch -position berücksichtigt. Die einzelnen Komponenten werden wiederum mit Hilfe genetischer Algorithmen aus Standardkomponenten, unter Berücksichtigung definierter Aufgabenstellungen, zusammengesetzt.

In Lohn und Hornby (2006) werden unterschiedliche Ansätze aus dem Bereich der sich selbst konfigurierenden Hardware (evolvable hardware) aufgezeigt. Wiederum ist die Konstruktionsphase als Optimierung ausgeführt. Als mögliche Kriterien werden dabei Kosten, Energieverbrauch oder auch die Größe des Systems vorgesehen. Die Realisierung basiert auf RP-Prozessen unter Verwendung zusätzlicher Bauelemente wie Antriebe oder Sensoren (Abbildung 2.15).

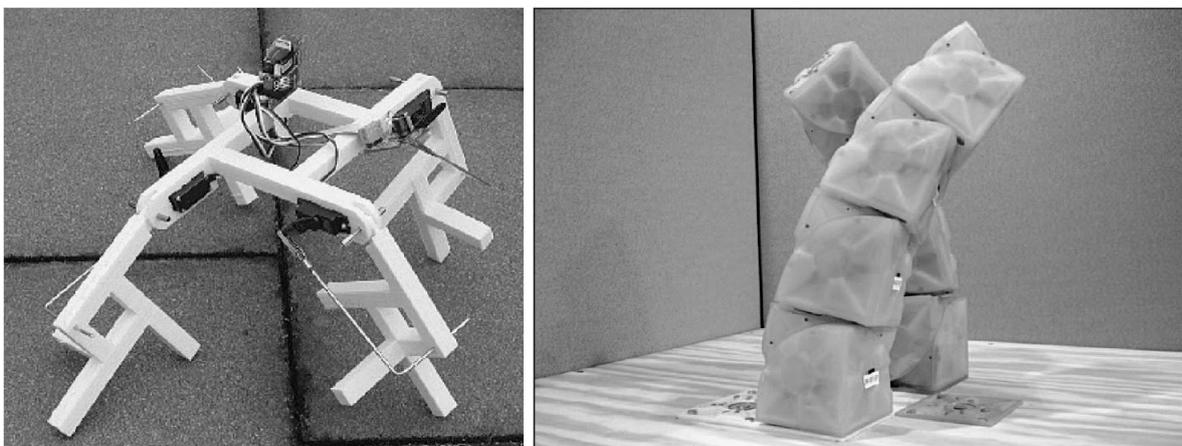


Abbildung 2.15: Beispiele aus dem Bereich sich selbst konfigurierender Hardware (evolvable design); Entnommen aus: Lohn und Hornby (2006).

## 2.6 Rapid Control Prototyping

Seit dem Aufkommen der Mechatronik geht die Anzahl der entwickelten rein mechanischen Produkte stetig zurück. Neue Entwicklungen beinhalten meist, neben der Mechanik, auch elektronische Bauteile (z. B. Mikrocontroller) sowie Elemente aus dem Bereich der Informationstechnik. Durch die hiermit steigende Komplexität der Produkte und damit auch deren Entwicklung sind neue Methoden zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses notwendig. Eine Möglichkeit ist das Rapid Control Prototyping (RCP), welches einen integrierten, rechnergestützten Entwicklungsprozess unterstützt (Abel & Bollig, 2006).

Im Sinne der in der vorliegenden Arbeit untersuchten zeitnahen, durch Prototypen unterstützten, Entwicklung von Mechanismen/Robotern muss gerade auch deren Aktuierung mit betrachtet werden. Daher wird im Folgenden auf das Vorgehen des RCP sowie aktuell existierenden Methoden eingegangen.

Nach Abel und Bollig (2006) gliedert sich das Vorgehen des RCP in sieben Entwicklungsschritte. Deren Einsatz kann bei Entwicklungen jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt sein. In der Praxis können auch einzelne Schritte entfallen. Zunächst müssen eine Modellbildung für die Aufgabenstellung sowie eine Simulation durchgeführt werden. Auf Basis dieses Modells wird eine Automatisierungsfunktion entworfen. Um mit dem System einen möglichst breiten Anwenderkreis ansprechen zu können, ist eine grafische, möglichst leicht verständliche Programmierung anzustreben. So kann ein effizienter sowie einfacher Einsatz der Methoden gewährleistet werden. Einer Erprobung des erstellten Modells am Rechner (software in the loop) folgt die Portierung und Codegenerierung für die Zielhardware. Nach der Übertragung erfolgen die Erprobung der Software am simulierten Prozess (hardware in the loop) sowie die Dokumentation der entworfenen Lösung. Neben den einzelnen Entwicklungsschritten müssen RCP-Systeme zusätzlichen Nebenanforderungen genügen. Hierzu zählt eine gute Kommentierung zur Verbesserung der Nachverfolgbarkeit der Softwarefunktionen. Darüber hinaus wird eine Verwendung standardisierter Datenstrukturen sowie die Integrationsfähigkeit in bereits vorhandene Systeme gefordert (Mostermann, 2006).

Beispiele aktueller, marktverfügbarer RCP-Systeme sind unter anderem die xPC-Target-Box und der Real-Time Workshop von The MathWorks™ sowie umfassende Systeme der dSPACE GmbH, National Instruments™ (MATRIXx/LabView), Visual Solutions Inc. (VisSim) oder auch Dassault Systèmes (Dymola).

Die Verwendung von RCP-Funktionalitäten und die automatische Code-Generierung erscheinen speziell im Bereich des Rapid Prototyping sowie bei geringen Stückzahlen sinnvoll. In kürzerer Zeit kann damit eine Vielzahl leicht veränderbarer Lösungen gefunden werden. Hierdurch kann das Hauptziel, die zeitnahe Codegenerierung für eine große Anzahl unterschiedlicher Prototypen, gewährleistet werden. Damit kann eine, heutzutage immer bedeutendere, Verringerung der time-to-market realisiert werden. Durch die schnellere Platzierung des Produkts im Markt können wichtige

Marktvorteile erzielt werden. Neben den zeitlichen Vorteilen stellt ein effizientes, automatisiertes RCP auch eine kostengünstige Erzeugung des Codes zur Ansteuerung von Prototypen bei eingeschränktem Lösungsraum dar. Durch das zeitnahe Feedback über das Systemverhalten können schnell Änderungsmaßnahmen eingeleitet werden (Mostermann, 2006). Die aufgrund des modularen Aufbaus entstehende Ineffizienz des Codes ist nebensächlich. Sie kann durch eine spätere Optimierung behoben werden (Maclay, 2000).

Neben den zeitlichen Vorteilen bewirken das RCP und die automatisierte Programmierung auch eine höhere Qualität sowie Zuverlässigkeit der Software. Durch eine geringere Fehleranzahl steigt auch die Produktivität der Programmierung. Der Aufwand für eine mögliche Fehlersuche wird aufgrund des modularen Aufbaus der Software verringert und die Durchführung von Updates vereinfacht (Weigert, et al., 2008).

## 2.7 Defizite am Stand der Technik

Aus dem Stand der Technik werden Nachteile im Hinblick auf eine schnelle und kostengünstige Entwicklung von Kinematiken für Mechanismen und Roboter ersichtlich. Diese Defizite kommen besonders im Bereich der Ergebnisdarstellung, der Funktionsüberprüfung sowie der Abstimmung auf das Zielsystem zum tragen. Sie können wie nachfolgend beschrieben werden:

### 2.7.1 Verknüpfung der Entwicklung mit der Ergebnisdarstellung

Nach der Entwicklung von Kinematiken für Mechanismen und Roboter mit Hilfe eines Entwicklungswerkzeugs hat eine geeignete Darstellung der Ergebnisse für den Anwender zu erfolgen. Neben der reinen Kommunikation des Ergebnisses ist es sinnvoll, bereits hier eine erste Überprüfung der Eignung des Konzepts durchzuführen. Die aktuell eingesetzten Systeme zur Kinematikentwicklung besitzen im Bereich der Ausgabe und Überprüfung der Ergebnisse folgende Nachteile:

- **Abstraktionsgrad der Darstellung:**

Das Ergebnis der Kinematikentwicklung mit Hilfe unterstützender Entwicklungssysteme wird zumeist rein virtuell, beispielsweise anhand abstrahierter Skizzen oder auch diskreter Parameter des Systems (Lenkerlängen etc.), am Rechner ausgegeben. Diese rein visuellen Beschreibungen tragen jedoch nur eingeschränkt zum Verständnis der Lösung sowie deren Prinzip bei. Daher werden sie durch anschaulichere, jedoch ebenfalls nur skizzenhafte, animierte Darstellungen (Simulationen) der Bewegungen ergänzt. Nur vereinzelt erfolgt die Ausgabe zu CAD-Systemen anhand grober Modelle oder Bounding-Box-Geometrien. Diese stellen dann jedoch nur eine 3-dimensionale Illustration des Systems dar, welche keinen Bezug zu realen, fertigungstechnisch realisierbaren Bauteilen besitzt. Aufgrund der nur abstrakten Darstellung können die Randbedingungen des Systems, z. B. verfügbare Bau- sowie Arbeitsräume, nicht oder nur grob mit berücksichtigt werden. So kann insgesamt zwar

das Entwicklungsergebnis selbst, jedoch nicht sein exaktes Zusammenwirken mit der Umwelt dargestellt werden. Allein in Lipson und Pollack (2000) erfolgt eine direkte Realisierung des Entwicklungsergebnisses anhand eines Prototyps. Der entwickelte Bewegungsroboter wird jedoch nicht anwendungsspezifisch, d. h. ohne exakte Zielvorgabe erstellt. Eine Abstimmung des Roboters auf die Umwelt entfällt gänzlich.

- **Aufwand der Prototypenerzeugung:**

Die Systeme zur Entwicklung/Definition funktionaler Roboter sind wie oben beschrieben auf eine virtuelle Ergebnisausgabe ausgelegt. Die über Schnittstellen im CAD visualisierbaren 3D-Modelle der entwickelten Lösung können aufgrund der nur groben Darstellung nicht direkt weiter verwendet werden. Eine Übertragung der Lösungsdaten zu Fertigungs- bzw. RP-Prozessen ist bislang nicht möglich. Sollen dennoch Prototypen erzeugt werden, ist hierfür zunächst eine aufwendige und kostenintensive Ergebnisübertragung notwendig. Diese besteht zum einen aus der händischen CAD-Konstruktion der Kinematik auf Basis der im Entwicklungssystem generierten Abmessungen, zum anderen aus der darauf folgenden Datenausleitung zu den Fertigungsprozessen (z. B. NC-Code-Generierung, STL-Daten-Generierung für RP-Prozesse). Erst dann kann eine Fertigung der Prototypen erfolgen. Die Arbeitsschritte der Übertragung sowie der Fertigung erfordern jedoch sowohl Zeit-, Personal- als auch Materialeinsatz und bilden somit einen nicht unerheblichen Teil der Kosten der Kinematikentwicklung. Diese sind zusätzlich vergleichsweise höher, wenn die Prototypen mit herkömmlichen anstelle von RP-Fertigungsverfahren erstellt werden.

Werden die aktuell verfügbaren Baukastensysteme während der Kinematikentwicklung verwendet, ist die Anschaulichkeit des Ergebnisses gewährleistet. Jedoch entstehen bei deren Einsatz anders geartete Nachteile:

- **Flexibilität der Entwicklungsdurchführung bei gleichzeitiger Anschaulichkeit:**

Zur Entwicklung von Kinematiken existieren zwei unterschiedliche Arten von Baukastensystemen. So sind rein materielle oder aber auch rein virtuelle Systeme bekannt. Bei ersteren, welche in standardisierte sowie maximalflexible Baukästen unterteilt werden können, beschränkt sich die Entwicklung auf eine manuelle Kombination fest vorgegebener Bauelemente zu einem Mechanismus/Roboter. Der Einsatz eines Entwicklungswerkzeuges erfolgt nicht. Eine am Rechner durchgeführte Anpassung des zusammengestellten Roboters an die Aufgabe erfolgt auf Basis einer Pfadplanung. Darüber hinaus haben die beiden Untergruppen zusätzlich individuelle Nachteile. So bieten die standardisierten Baukästen aufgrund ihrer geringen Anzahl komplexer Bauteile nur eine eingeschränkte Flexibilität und lassen zumeist verschiedene Baureihen oder Kinematikelemente wie z. B. Linearführungen vermissen. Durch die wiederum hohe Teileanzahl der maximalflexiblen Baukästen ist bei diesen die

Montage erschwert. Darüber hinaus sind die fertig gestellten Kinematiken sehr prototypisch und daher nur für eine erste Darstellung des Roboters tauglich. Virtuelle Baukästen bieten die Möglichkeit einer flexiblen Kombination von Bauelementen. Jedoch entfällt hier die direkte prototypische Realisierung der Lösung.

## 2.7.2 Funktionsüberprüfung durch Betrieb der entwickelten Systeme

Neben der rein kinematischen Darstellung des Entwicklungsergebnisses ist zusätzlich eine Überprüfung dessen Funktionalität notwendig. Dies kann durch die Aktuierung der Prototypen erfolgen. Da die bekannten Werkzeuge zur Entwicklung serieller Kinematiken jedoch keine Domänen übergreifende Entwicklung ermöglichen, besitzen sie einige Nachteile, welche im Folgenden dargestellt werden:

- **Fehlende Integration von Antrieben:**

Die Überprüfung der Funktion der mit Hilfe von Softwaresystemen entwickelten Kinematiken ist auch bei Einsatz von Prototypen nur durch eine geeignete Aktuierung adäquat möglich. Bei den mittels Entwicklungswerkzeugen erstellten Kinematiken sind jedoch, wie oben aufgezeigt, keine Hardware-Ausgabe und somit auch keine Aktuierung möglich. Zudem wurde, außer bei der von Lipson und Pollack (2000) durchgeführten Entwicklung von Bewegungsmaschinen, bei den bekannten Beispielen der Fertigung anwendungsnaher RP-Mechanismen keine Integration von Antrieben durchgeführt. Es sind lediglich Beispiele bekannt, bei welchen rein am CAD entwickelte Mechaniken mit Hilfe von Rapid-Prototyping-Prozessen dargestellt werden. Damit ist dann zwar eine Abschätzung der Abmessungen möglich, eine Überprüfung der Funktion kann jedoch nicht realisiert werden. Bei der Verwendung materieller, daher jedoch in ihrer Flexibilität eingeschränkter Baukastensysteme stellt dieser Punkt kein Problem dar.

- **Entwicklungsunabhängige und aufwändige Erstellung der Ansteuerung:**

Baukastensysteme und damit auch die daraus entwickelten Kinematiken besitzen meist integrierte Antriebe. Sollen jedoch neben den kinematischen auch die kinetischen Eigenschaften des entwickelten Systems untersucht bzw. das System angewendet werden, ist hierfür zunächst eine Pfadplanung notwendig. Von dieser wiederum wird in einem zusätzlichen Schritt die Erstellung der Ansteuerung der Antriebe der Mechanismen/Roboter abgeleitet. Dieser erfolgt jedoch nach der Festlegung der Kinematik und damit losgelöst von der eigentlichen Kinematikentwicklung. Von aktuell verfügbaren virtuellen Kinematikentwicklungssystemen ist lediglich die reine Ausgabe von Gelenkwinkeln, nicht aber eine effiziente Möglichkeit zur Erstellung der Ansteuerung der Antriebe der entwickelten Mechanismen/Roboter bekannt. Die Steuerung muss separat erstellt werden. Zur zeiteffizienten Erstellung des Steuerungscode können neuartige Methoden aus dem Bereich des Rapid Control Prototyping verwen-

det werden. Mit diesen kann eine individuelle Ansteuerung bei verringertem Zeitaufwand implementiert werden. Hierfür verfügbare RCP-Systeme bieten einen sehr großen, für viele Anwendungen größtenteils nicht notwendigen, Funktionsumfang. Durch die daher erhöhte Komplexität wird die Bedienung aufwendiger und entsprechende Vorkenntnisse zur Bedienung werden notwendig.

### 2.7.3 Abstimmung auf das Zielsystem

Durch eine geeignete Abstimmung der Entwicklung auf das vorgesehene Zielsystem können viele mögliche Fehler bereits vor ihrem Auftreten bei der Darstellung des Entwicklungsergebnisses sowie der Funktionsüberprüfung vermieden werden. Hierfür müssen die durch das Zielsystem verursachten Nebenbedingungen in die Entwicklung mit einfließen. Bestehende Entwicklungssysteme besitzen jedoch Nachteile in Bezug auf die Berücksichtigung dieser Nebenbedingungen:

- **Mangelnde Berücksichtigung des aktuellen Systems:**  
 Einige Entwicklungsumgebungen konzentrieren sich ausschließlich auf die Kinematik der zu entwickelnden Mechanismen/Roboter. Daher wird nicht auf die vorgegebenen Umweltbedingungen des Zielsystems eingegangen. Somit entfällt auch jede Abstimmung mit dem bzw. Anpassung an das Zielsystem gänzlich. Hierdurch besteht bei der Integration des Systems in die Zielumgebung die Gefahr von z. B. Raumkonflikten. Daraus ergibt sich in der Folge die Notwendigkeit einer erneuten Anpassung des Systems. Werden in einigen aktuellen Entwicklungsprozessen anwendungs- und situationsspezifische Randbedingungen der Zielsysteme betrachtet, geschieht dies nur begrenzt. Vorhandene Bauräume während der Kinematikentwicklung werden dann nur in grober Näherung betrachtet. So können sie in einigen Systemen in Form stark abstrahierter Elemente (z. B. rechteckige Umrisse) berücksichtigt werden. Diese abstrahierten Eingabemöglichkeiten bewirken jedoch eine Einschränkung des Lösungsraums während der Entwicklung. Darüber hinaus gestaltet sich die meist manuelle Eingabe der Randbedingungen aufgrund fehlender Importmöglichkeiten wenig intuitiv sowie wenig anschaulich. Durch Unterschiede zwischen dem vorgegebenen und dem tatsächlich verfügbaren Raum können nach abgeschlossener Mechanismenerstellung erneut Korrekturen an der Kinematik nötig werden.
- **Unzureichend optimierte Systeme durch geteilte Entwicklung:**  
 Weiterhin wird die Entwicklung von Mechanismen und Robotern oft in zwei Schritten durchgeführt. Der Entwicklung der Kinematik folgt die Pfadplanung. So wird zunächst die Kinematik, im nächsten Schritt dann auch die Aktuierung hinsichtlich der Randbedingungen optimiert. Da die Kinematik dann zum Zeitpunkt der Steuerungsentwicklung bereits festgelegt ist, kann die Ansteuerung lediglich für die bestehende kinematische Konfiguration optimiert werden. Eine gesamthafte Optimierung der Teilbereiche der Mechanismenentwicklung fin-

det nicht statt. Mögliche Synergieeffekte durch die Verbindung beider Entwicklungsschritte können so nicht realisiert werden. Das Vorgehen birgt so die Gefahr der Generierung eines zunächst die Bewegungsaufgabe erfüllenden Mechanismus/Roboters, welcher sich bei späteren Betrachtungen (z. B. bei der Steuerungsentwicklung) als ungeeignet erweist.

### 3. Anwendungsspezifische Kinematikentwicklung unter Einsatz modularer Prototypen

Zur Überwindung der Defizite des Stands der Technik wird das nachfolgend beschriebene System der durch Prototypen unterstützten, anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung für serielle Mechanismen und Roboter vorgeschlagen. Durch die darin realisierte Verknüpfung der virtuellen Entwicklung mit einem Baukastensystem sollen die Vorteile der beiden Entwicklungsrichtungen vereint sowie deren Nachteile vermieden werden. Das System umfasst alle essentiellen Arbeitsschritte der Kinematikentwicklung von der Definition der Aufgabenstellen und der Eingabe von Parametern und Randbedingungen, über die Synthese der Kinematik bis hin zur Ausgabe des Entwicklungsergebnisses (Abbildung 3.1). Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt jedoch auf der Erstellung des zugrunde liegenden unterstützenden, multikriteriellen Mechanismenbaukastens, der anschaulichen Ausgabe des Entwicklungsergebnisses anhand von Prototypen sowie der Überprüfung der Funktionalitäten durch Aktuierung des neu geschaffenen Systems. Durch diese Komponenten soll ein beschleunigter sowie kostengünstiger Entwicklungsprozess ermöglicht werden. Die verbesserte Anschaulichkeit und Durchgängigkeit der Entwicklung sollen zudem auch auf dem Gebiet der Roboterentwicklung unerfahrenen Personen Zugang zur Kinematikentwicklung gewährleisten. Die auf das Zielsystem ausgerichtete, produktnahe Entwicklung soll dem Anwender neben den zeitlichen auch betriebswirtschaftliche Vorteile bieten.

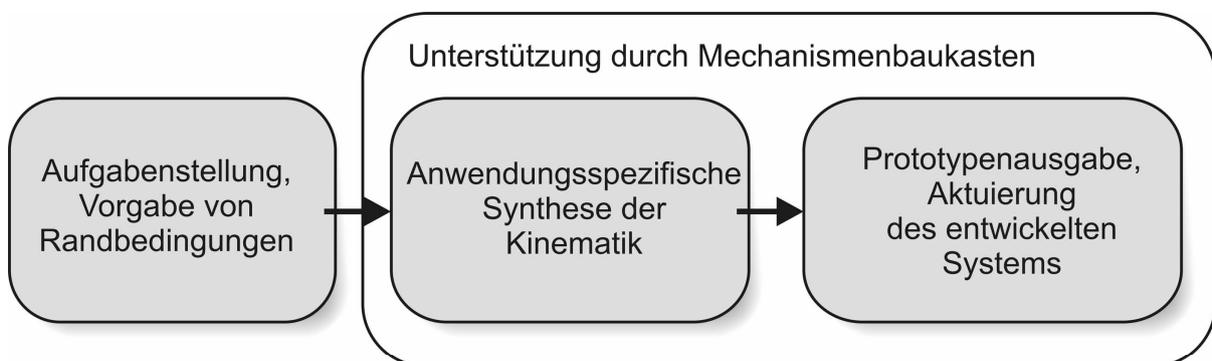


Abbildung 3.1: Arbeitsschritte des Systems zur anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung mit Prototypenausgabe unter Verwendung eines multikriteriellen Mechanismenbaukastens.

#### 3.1 Eigener Ansatz

Das wesentliche Augenmerk des in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen Systems zur Unterstützung der Kinematikentwicklung für serielle Mechanismen und Roboter liegt auf folgenden neuartigen Eigenschaften:

- **Durchgängiger, multikriterieller Mechanismenbaukasten:**  
Für die Realisierung einer durchgängigen, angepassten Kinematikentwicklung

ist die Berücksichtigung aller Eigenschaften und Parameter der zu entwickelnden Systeme notwendig. Um diese erfassen und darstellen zu können, wird die Verwendung eines modularen Mechanismenbaukastens vorgeschlagen. Durch Verbindung der Eigenschaften bestehender standardisierter sowie maximalflexibler Baukastensysteme soll dieser als hybrider Baukasten ausgeführt sein, mit welchem die jeweiligen Vorteile beider Systeme genutzt, deren Nachteile jedoch vermieden werden. Der Baukasten enthält exakte Abbildungen einzelner Kinematikelemente, welche zu kompletten Mechanismen verknüpft werden können. Diese Kombinationen können durch Parametervariation hinsichtlich einzelner oder mehrerer Kriterien optimiert werden. Für die Baukastenelemente sind jeweils Repräsentationen wie ein kinematisch-mathematisches Modell zur Durchführung der Synthese oder auch ein geometrisches Modell zur Visualisierung hinterlegt. Weitere Repräsentationen der Elemente, z. B. Bounding-Box-Modelle, dienen der Durchführung einzelner Entwicklungsschritte wie beispielsweise der Kollisionsvermeidung. Die Repräsentationen der Baukastenelemente bilden weiterhin die Schnittstellen zwischen den aufgrund der Komplexität notwendigen Entwicklungsschritten. Hierdurch kann ein durchgängiger Gesamtentwicklungsprozess gewährleistet werden. Von jedem Gelenk- sowie Verbindungselement sollen weiterhin verschiedene Derivate im Baukasten hinterlegt sein, welche sich beispielsweise hinsichtlich ihrer Skalierung unterscheiden.

- **Erweiterte Abstimmung auf das Zielsystem und ganzheitliche Entwicklung:**

Mechanismen und Robotersysteme stehen während ihres Einsatzes stets in Verbindung mit ihrer Umwelt. Daher ist eine der größten Herausforderungen bei deren Entwicklung die Berücksichtigung der Vielzahl von Anforderungen und Randbedingungen des jeweiligen Einzelfalls. Neben der gewünschten Bewegungsbahn sind hierbei die für die Integration von Systemelementen verfügbaren Bauräume sowie die für deren Bewegungen vorhandenen Arbeitsräume zu nennen. Darüber hinaus spielen oftmals Nebenbedingungen wie der Energieverbrauch des Systems, die Einschränkungen der Beweglichkeit durch die verwendeten Antriebe sowie der einzuhaltende Kostenrahmen eine Rolle. Die vorgestellte Methode setzt auf eine von Beginn an zielgerichtet durchgeführte Entwicklung. Hierdurch soll eine verbesserte Abstimmung auf die vorhandene Systemumgebung erreicht werden. Aufgrund von Konflikten des Systems mit Randbedingungen nötig werdende Anpassungen/Neuauslegungen in späteren Entwicklungsphasen können so vermieden werden. Hierdurch kann unter anderem auch eine Reduktion der Entwicklungszeit erreicht werden. In der vorliegenden Arbeit soll speziell auf die Berücksichtigung von Bau- und Arbeitsräumen sowie die Erstellung einer individuellen Zielfunktion eingegangen werden. Hierzu sollen auch Möglichkeiten zur geeigneten Definition dieser Randbedingungen implementiert werden. Der mit dem entwickelten Werkzeug durchführbare Entwurf serieller Kinematiken ist nicht als isolierter Prozess im

Sinne der klassischen Getriebesynthese zu verstehen. Er bildet vielmehr eine mechatronische Aufgabenstellung. In diese soll, neben der reinen Kinematiksynthese auch die Integration der Antriebe und die Entwicklung deren Steuerung mit einbezogen werden. Speziell durch diese Kombination von Hardware- und Steuerungsentwicklung entstehen Synergieeffekte, welche die Effizienz der Entwicklung steigern. So wird beispielsweise eine Entwicklung hinsichtlich der Ansteuerung einseitig optimaler Roboter/Mechanismen verhindert und eine gesamthafte Optimierung, sowohl hinsichtlich Kinematik als auch Kinetik, bewirkt.

- **Rapid-Prototyping-Prozesse zur frühzeitigen und produktnahen**

- **Ergebnisausgabe:**

- Die Ausgabe des Ergebnisses stellt einen wichtigen Faktor der Effizienz von Werkzeugen zur Kinematikentwicklung dar. Als Erweiterung bislang verfügbarer Ausgabemöglichkeiten wird eine CAD-Verknüpfung in Kombination mit einer direkten Erstellung von Mechanismenmodellen vorgeschlagen. Die Modellherstellung erfolgt dabei mittels Rapid-Prototyping-Verfahren. Um diese direkte Fertigung von Modellen zu ermöglichen, muss eine flexible Ausgabe der Geometriedaten mit Hilfe tauglicher Datenformate realisiert werden. Eine Voraussetzung hierfür stellt eine parametrisierte Repräsentation der Kinematikkomponenten im Mechanismenbaukasten dar. Mit Hilfe der angefertigten RP-Produktmodelle können die möglichen Bewegungen und die Erreichbarkeiten sowie die Arbeitsräume der aktuell entwickelten Kinematiken gegenüber traditionellen Fertigungsverfahren zeitnah und kostengünstig dargestellt werden. Auf diese Weise gewährleistet diese beschleunigte Prototypenerzeugung eine gute Kommunikation des Ergebnisses gegenüber dem Anwender und ermöglicht Eigenschaftsfrüherkennungen. Im Falle von Fehlern während der Entwicklung kann so ein frühzeitiges, regulierendes Eingreifen in den Entwicklungsprozess realisiert werden. Hierdurch kann die Produktentwicklung zielgerichteter und schneller durchgeführt werden. Um Fehler während des Prototypenbaus ausschließen zu können, müssen dem Entwickler zusätzliche Informationen über die konkrete Fertigung der Kinematik gegeben werden. Diese sollen ihm anhand von Bau- und Montageplänen etc. zur Verfügung stehen.

- **Überprüfung der Funktionalitäten des entwickelten Systems durch Aktuierung von Prototypen im Zielsystem:**

- Da die Funktionserfüllung von Mechanismen und Robotern sowie die Qualität der durchgeführten Bewegungen stark von deren Ansteuerung abhängen, ist neben der reinen Darstellung der Kinematik ein weiterer Schritt notwendig. So muss die Kinetik der Systeme überprüft werden. Daher werden die erforderlichen Systemdaten (z. B. Gelenkwinkel) der während der Entwicklung bereits berücksichtigten Bewegungen der integrierten Antriebe als Information zur Realisierung der Ansteuerung ermittelt. Hieraus wird ein Programmcode zur mikrocontrollergesteuerten Aktuierung der Kinematik bzw. des Roboters generiert. Damit wird die Voraussetzung für eine direkte und hardwarenahe Über-

prüfung der Funktionen und der Eigenschaften des Entwicklungsergebnisses mit Hilfe bewegter Prototypen geschaffen.

## 3.2 Abgrenzung

Wie aus dem Stand der Technik ersichtlich ist, werden sowohl die Verfahren der Roboterentwicklung als auch des Rapid Prototyping in vielen Aufgabenbereichen eingesetzt. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich jedoch auf den im eigenen Ansatz beschriebenen Teilbereich der Kinematikentwicklung mit Unterstützung von Prototypen. Dieser ist klar von den folgenden Disziplinen abzugrenzen:

- **Entwicklung von Synthese- und Pfadplanungsverfahren:**  
Zur Entwicklung von Mechanismen und Robotern sowie zu deren Pfadplanung existiert, wie im Stand der Technik beschrieben, eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren. Diese stellen ausgereifte Methoden, Vorgehensweisen oder Softwaresysteme sowohl zur Konzeptentwicklung als auch zur Optimierung dar. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt jedoch nicht auf der Entwicklung verbesserter Synthese- und Pfadplanungsmethoden. Für diese Teilaufgaben des Gesamtentwicklungsprozesses wird ein einfaches, als Parametervariation ausgebildetes Verfahren implementiert.
- **Existierende Baukastensysteme zur Prototypenfertigung:**  
Wie im Stand der Technik beschrieben, sind unterschiedliche Baukastensysteme zur Erstellung von Mechanismen bzw. Robotern bekannt. Diese sind jedoch nicht im Umfeld von Methoden zur Kinematiksynthese zu sehen. Die Roboter werden beliebig und intuitiv aus den Bauelementen zusammengestellt und daraufhin durch eine Pfadplanung an die jeweilig durchzuführende Aufgabe angepasst. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Kinematikerstellung jedoch unter Verwendung der im Baukasten hinterlegten hybriden und flexiblen Elemente auf Basis einer Kombination von Synthese und Pfadplanung.
- **Modellfertigung mittels Rapid Prototyping:**  
Zum Zwecke der alleinigen Darstellung von Entwicklungsergebnissen sowie zu Lehrzwecken ist die Verwendung des auch in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Rapid-Prototyping-Verfahrens bereits bekannt. Dabei werden beispielsweise Design- oder Ergonomiemodelle angefertigt, um richtungsweisende Entscheidungen zu beschleunigen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gefertigten Roboter gehören jedoch in den Bereich der Funktionsmodelle und Prototypen. Sie besitzen durch die Integration von Antrieben sowie die Möglichkeit zu deren Ansteuerung einen erhöhten Funktionsumfang. Ihre Erstellung mit Hilfe des Kinematikbaukastens basiert direkt auf den Ergebnissen des Kinematikentwicklungsprozesses und geschieht ohne die üblicherweise durchgeführte, notwendige Konstruktionsarbeit mittels CAD-Systemen.
- **Robotische Lebensformen:**  
Wie oben bereits aufgezeigt, befassen sich einige Forschergruppen unter

Verwendung genetischer Lösungsprozesse mit der Entwicklung robotischer Lebensformen. Von diesen werden dann ebenfalls Prototypen, unter anderem mittels RP-Verfahren, hergestellt. Jedoch ist bei der Entwicklung dieser Roboter, neben der Maßgabe der Fortbewegung, keine klare Aufgabenstellung definiert. Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene System ermöglicht die gezielte Entwicklung serieller Mechanismen und Roboter hinsichtlich einer definierten Bewegungsaufgabe. Zusätzlich werden die Randbedingungen des Gesamtsystems mit einbezogen. Mögliche Fehler wie Kollisionen mit anderen Objekten oder Eigenkollisionen, welche aufgrund geringer Berücksichtigung von Randbedingungen geschehen, sollen ausgeschlossen werden.

## 4. Gesamtkonzept des Systems zur Kinematikentwicklung unter Einsatz modularer Prototypen

Auf Basis des eigenen Ansatzes wurden Methoden zur Realisierung eines Systems zur anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung unter Einsatz modularer Prototypen entwickelt und anhand einzelner Teilfunktionen zum Zwecke der Validierung implementiert. Das Systemkonzept beinhaltet einen Mechanismenbaukasten sowie weitere, durch Schnittstellen verbundene Komponenten. Diese dienen der Abstimmung auf das Zielsystem, der Kinematikentwicklung (Synthese), der Ergebnisausgabe, der Verknüpfung zu RP-Prozessen sowie der Ansteuerungserstellung. Mittels dieser Module kann eine ganzheitliche Entwicklung durchgeführt und das Ergebnis zuletzt hinsichtlich seiner Funktionalität untersucht werden (Abbildung 4.1).

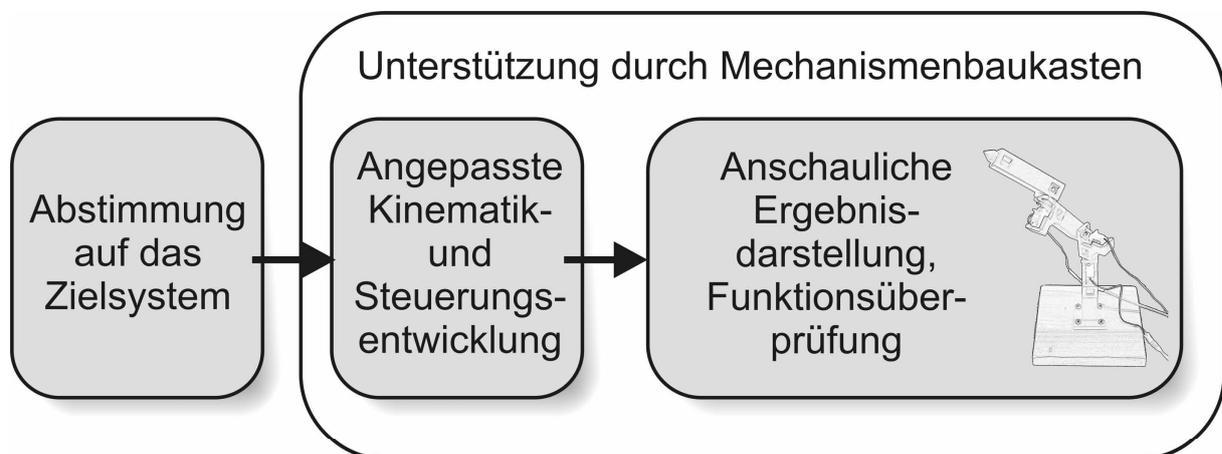


Abbildung 4.1: Durch Verwendung eines Mechanismenbaukastens sowie den Einsatz von RP-Technologien ergibt sich die Möglichkeit, das Ergebnis der angepassten Entwicklung serieller Kinematiken und Roboter unmittelbar anhand materieller, aktuierter Funktionsprototypen zu realisieren. So kann zeitnah die Funktionalität der Entwicklung überprüft werden.

### 4.1 Ablauf der Kinematikentwicklung

Die Entwicklung angepasster Kinematiken für Mechanismen und Roboter beginnt mit der Definition einer Aufgabenstellung und endet mit der Fertigstellung eines aktuierbaren Funktionsprototyps. Dazwischen ist eine Reihe von Arbeitsschritten notwendig, bei deren Bearbeitung verschiedene Hilfsmittel eingesetzt werden. Diese erfordern jeweils eine unterschiedlich starke Einbindung des Entwicklers. Nachfolgend wird die verwendete Entwicklungsmethodik, untergliedert in acht einzelne Arbeitsschritte, aufgezeigt. Die Schritte können den Bereichen *Benutzereingaben*, *Synthese* bzw. *Entwicklung der Kinematik/des Roboters* sowie *Prototypenausgabe und Überprüfung der Funktionalität* zugeordnet werden (Abbildung 4.2).

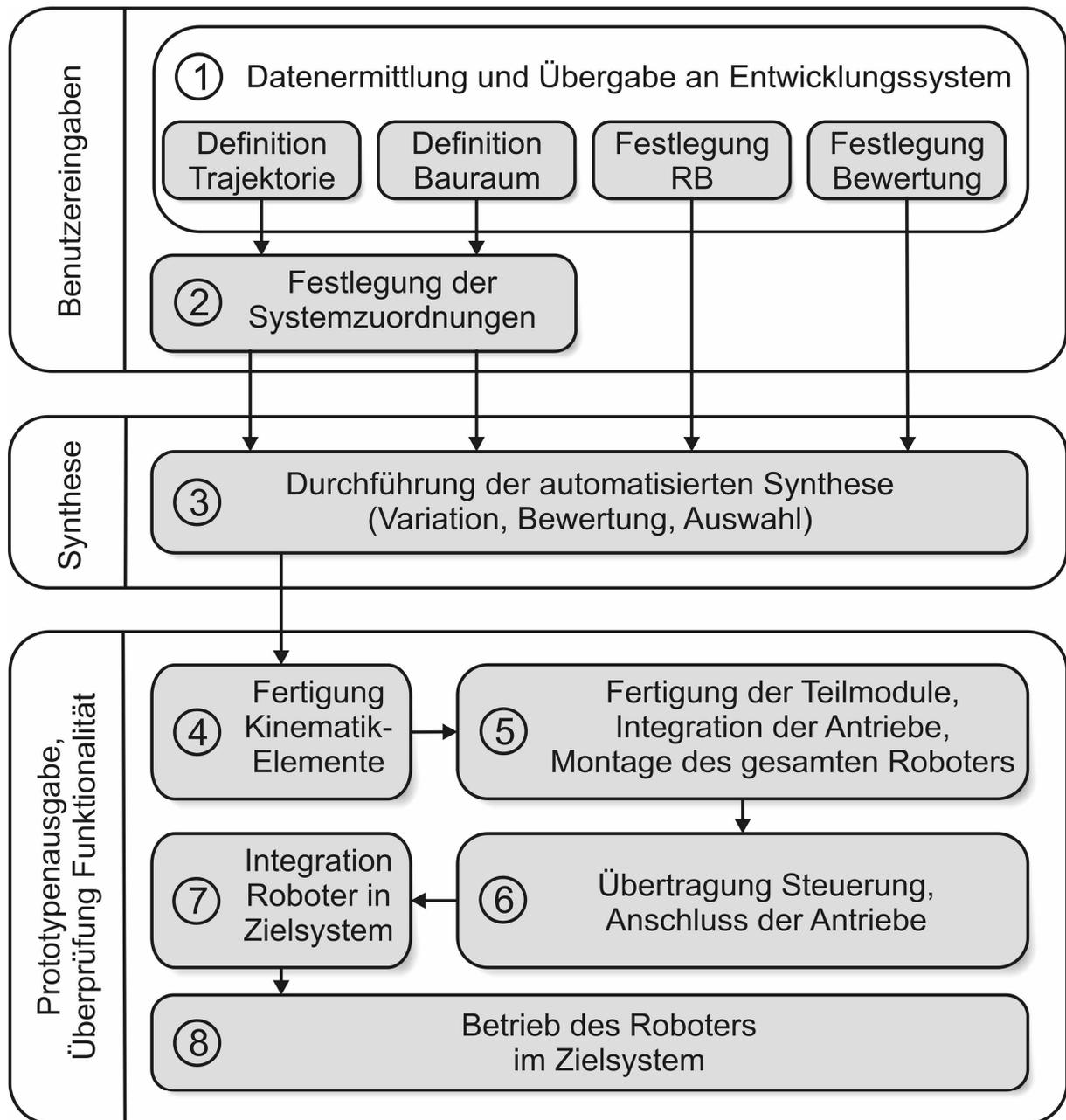


Abbildung 4.2: Ablauf der durch Funktionsprototypen unterstützten, anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung für serielle Mechanismen und Roboter mit Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Bereichen der Datenermittlung, der Kinematiksynthese sowie der Prototypenausgabe und Funktionsüberprüfung.

### Benutzereingaben:

#### 1. Datenermittlung und Übergabe an das Entwicklungssystem:

Dieser Arbeitsschritt dient der Erhebung der für die Entwicklung des neuen Roboters zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen. Hierzu gehört zunächst die von der aktuellen Aufgabenstellung abhängige, zu realisierende Bewegungsbahn (Trajektorie). Diese wird mit Hilfe eines intuitiv zu bedienenden Eingabegeräts generiert und in geeigneter Weise dokumentiert. Weiterhin werden in diesem Arbeitsschritt die durch die Zielumgebung verursachten

Rahmenbedingungen definiert. Dies sind die für die neue Kinematik verfügbaren Bauräume zur Positionierung möglicher Gelenkpunkte und Kinematikelemente sowie die für deren Bewegung möglichen Arbeitsräume. Deren Definition erfolgt wiederum intuitiv und in Abhängigkeit vom Entwicklungsfortschritt der bereits bestehenden Zielumgebung. Für frühe Entwicklungsphasen werden hierfür Konzeptskizzen verwendet. Diese werden von Papierform in eine digitale Form überführt und durch verschiedene Bearbeitungen auf die weitere Verwendung vorbereitet. Bei weiter fortgeschrittenen Entwicklungen werden für die Bau- und Arbeitsraumdefinition bereits vorhandene CAD-Daten der Zielumgebung verwendet. Darüber hinaus werden während der Datenermittlung zusätzliche Informationen zur Beeinflussung der späteren Entwicklung festgelegt. Hierzu zählen beispielsweise Einschränkungen in der maximalen Gliedanzahl der Kinematik oder auch für deren Aufbau vorhandene Gewichts- oder Kosteneinschränkungen. Weiterhin werden die anhand der vorgegebenen Randbedingungen definierten Entwicklungsziele definiert und in ihrer Priorität zueinander gewichtet. Hierdurch kann nachfolgend eine Bewertungsfunktion zur Unterstützung der Auswahl geeigneter Kinematiken erstellt werden.

## **2. Festlegen der Systemzuordnungen:**

Werden, neben der Trajektorie, während der Entwicklung zu berücksichtigende Daten wie Bau- und Arbeitsräume definiert, so ist eine räumliche Zuordnung dieser geometrischen Daten untereinander notwendig. Dies ist eine Folge der Verwendung verschiedener, zunächst voneinander unabhängiger Datenquellen, welche beispielsweise unterschiedliche Maßstäbe oder auch Ursprünge ihrer Koordinatensysteme besitzen. So wird in diesem Arbeitsschritt z. B. die zu realisierende Trajektorie den vorhandenen Bauräumen örtlich zugeordnet.

## **Synthese bzw. Entwicklung der Kinematik/des Roboters:**

### **3. Durchführung der Synthese:**

Die Synthese des die Aufgabenstellung erfüllenden Mechanismus erfolgt weitestgehend unabhängig vom Anwender. In Abhängigkeit von den vorab erfolgten Benutzereingaben wird dabei auf unterschiedliche Teilfunktionen der Syntheseumgebung (Bauraumvariation, Kollisionserkennung etc.) zurückgegriffen. Während der Synthese werden Kinematiken aus den Grundelementen des Mechanismenbaukastens erstellt und sowohl hinsichtlich ihrer Konfiguration als auch Ansteuerung variiert. Zur Bewertung der entstandenen kinematischen Lösungskonzepte wird eine, aus den vom Benutzer definierten Entwicklungszielen erstellte, Bewertungsfunktion verwendet. Während der unterschiedlichen Arbeitsschritte der Synthese kommen die verschiedenen, über einen eindeutigen Zuordnungsindex referenzierten, Repräsentationen der Einzelelemente des Mechanismenbaukastens problembezogen zur Anwendung.

## **Prototypenausgabe und Überprüfung der Funktionalität:**

### **4. Fertigung der Kinematikelemente:**

Nach der Durchführung der Kinematiksynthese erfolgt die Ausgabe der ermittelten Daten des entwickelten Mechanismus/Roboters. Neben den aus dem Stand der Technik bekannten Möglichkeiten erfolgt hier zusätzlich die Ausgabe von 3D-Geometriedaten der ermittelten Kinematik im oben bereits vorgestellten STL-Format. Diese werden vom Anwender zur Fertigung der einzelnen Elemente der Kinematik mittels einer Rapid-Prototyping-Anlage verwendet.

### **5. Fertigung der Teilmodule, Integration der Antriebe und Montage des gesamten Roboters:**

Die mittels der RP-Anlage erstellten Einzelelemente des Mechanismus/Roboters werden in diesem Arbeitsschritt dazu verwendet, die einzelnen Module des Roboters zu fertigen. Zunächst erfolgt jedoch eine Nachbearbeitung der Teilelemente. Diese wird vom Anwender durchgeführt und ist von der Art des verwendeten RP-Verfahrens und der damit verbundenen Qualität der Bauteile abhängig. Sie kann beispielsweise die Bearbeitung der Funktionsflächen oder auch die Verfestigung (Infiltration) der Bauelemente umfassen. Zusätzlich können zur späteren Integration der Antriebe und zur Montage des Roboters Verbindungselemente (z. B. Gewindehülsen) eingefügt werden. Nach dem Anbau der Antriebe an die einzelnen Kinematikkomponenten, wird der Roboter aus seinen Teilmodulen zusammengefügt. Für die korrekte Montage werden vom System Hilfsmittel wie eine Kennzeichnung der Bauelemente oder auch Montagezeichnungen zur Verfügung gestellt. Diese legen unter anderem die Reihenfolge der Montage fest, welche über definierte Schnittstellen der Systemkomponenten erfolgt. Bereits ab dem Zeitpunkt seiner Fertigstellung können durch rein manuelle Bewegung des Roboters Informationen über dessen mögliche Eigenschaften (Arbeitsraum etc.) abgeleitet werden. Hierdurch können ungeeignete Kinematiken bereits in diesem Stadium erkannt und verworfen werden. Zusätzlich können angepasste Nebenbedingungen für eine wiederholte Iteration des Entwicklungsprozesses definiert werden.

### **6. Übertragung der Bewegungsinformation an die Ansteuerungseinheit und Anschluss der Antriebe:**

Um eine automatisierte Bewegung des Roboters zu ermöglichen, erfolgt nun die Übertragung der Informationen zur Ansteuerung der Motoren vom Entwicklungssystem zur Ansteuerungseinheit. Da diese über einen Mikrocontroller verfügt, wird der Transfer der Daten zu diesem über eine festgelegte Software- sowie Hardware-Schnittstelle (z. B. AVR-Studio für Atmel<sup>®</sup>-Prozessoren) realisiert. Die übertragenen Daten sind zum Teil als fertiger, einmalig erstellter Programmcode bereits vorhanden. Der verbleibende, individuell von der aktuellen Kinematik und deren Anwendung abhängige Teil der Daten soll jeweils

automatisch aus den Daten der Synthese erzeugt werden. Nach der Datenübertragung werden die Antriebe durch den Benutzer über die vorgesehenen Schnittstellen mit der Steuerbox verbunden. Zuletzt erfolgt eine möglichst kollisionsfreie Verlegung der Verkabelung.

#### **7. Integration des Roboters in das Zielsystem:**

Um die Vorteile der anwendungsspezifischen Entwicklung ausschöpfen und das Ergebnis anschaulich darstellen zu können, ist eine Verbindung zum Zielsystem herzustellen. Hierfür wird der entwickelte Roboter an die für ihn vorgesehene Position im Zielsystem oder dessen Modell gebracht. Neben der Positionierung muss hier auch auf eine korrekte Einbauausrichtung geachtet werden.

#### **8. Betrieb des Roboters im Zielsystem:**

Zuletzt wird der Roboter im Zielsystem oder dessen Modell in Betrieb genommen. Anhand des endgültigen, gesteuerten Betriebs des Roboters im Zielsystem mit Hilfe der Steuerbox werden die Konformität mit dem Bauraum sowie der erreichbare Arbeitsraum ersichtlich. Der Benutzer kann hierdurch Schlüsse über die Zielerfüllung des entwickelten Systems ziehen. Darüber hinaus können Hinweise auf eine mögliche Optimierung des Systems ermittelt und Maßnahmen hierfür abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang können wiederum zusätzliche Randbedingungen definiert werden, welche dann bei einem erneuten Durchlaufen des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden.

## **4.2 Statische Beschreibung verwendeter Teilelemente**

Das beschriebene System zur angepassten Kinematikentwicklung beinhaltet einen sowohl virtuell als auch materiell repräsentierten Mechanismenbaukasten sowie weitere Hard- und Softwarekomponenten (Abbildung 4.3).

Diese drei Teilbereiche setzen sich aus folgenden Elementen zusammen:

#### **Mechanismenbaukasten:**

- Mathematische/geometrische Repräsentationen der verfügbaren Kinematikkomponenten
- Hardware-Baukasten mit Kinematikelementen

#### **Hardware-Komponenten des Entwicklungssystems:**

- Trajektorien-Eingabegerät
- Scanner zur Digitalisierung
- Entwicklungs-Rechner mit unterschiedlichen Schnittstellen
- Rapid-Prototyping-Anlage mit Nachbearbeitungsplatz

- Mikrocontroller-Steuerbox

### Software-Komponenten des Entwicklungssystems:

- Modul zur Definition von Nebenbedingungen und Bahnvorgabe
- Modul zur Bau- und Arbeitsraumdefinition
- Kinematiksynthese- und Bewertungsmodul
- Visualisierungs- und Datenerzeugungsmodul
- 3D-Datenerzeuger (STL-Format)
- Software zur Erzeugung des Ansteuerungscodes

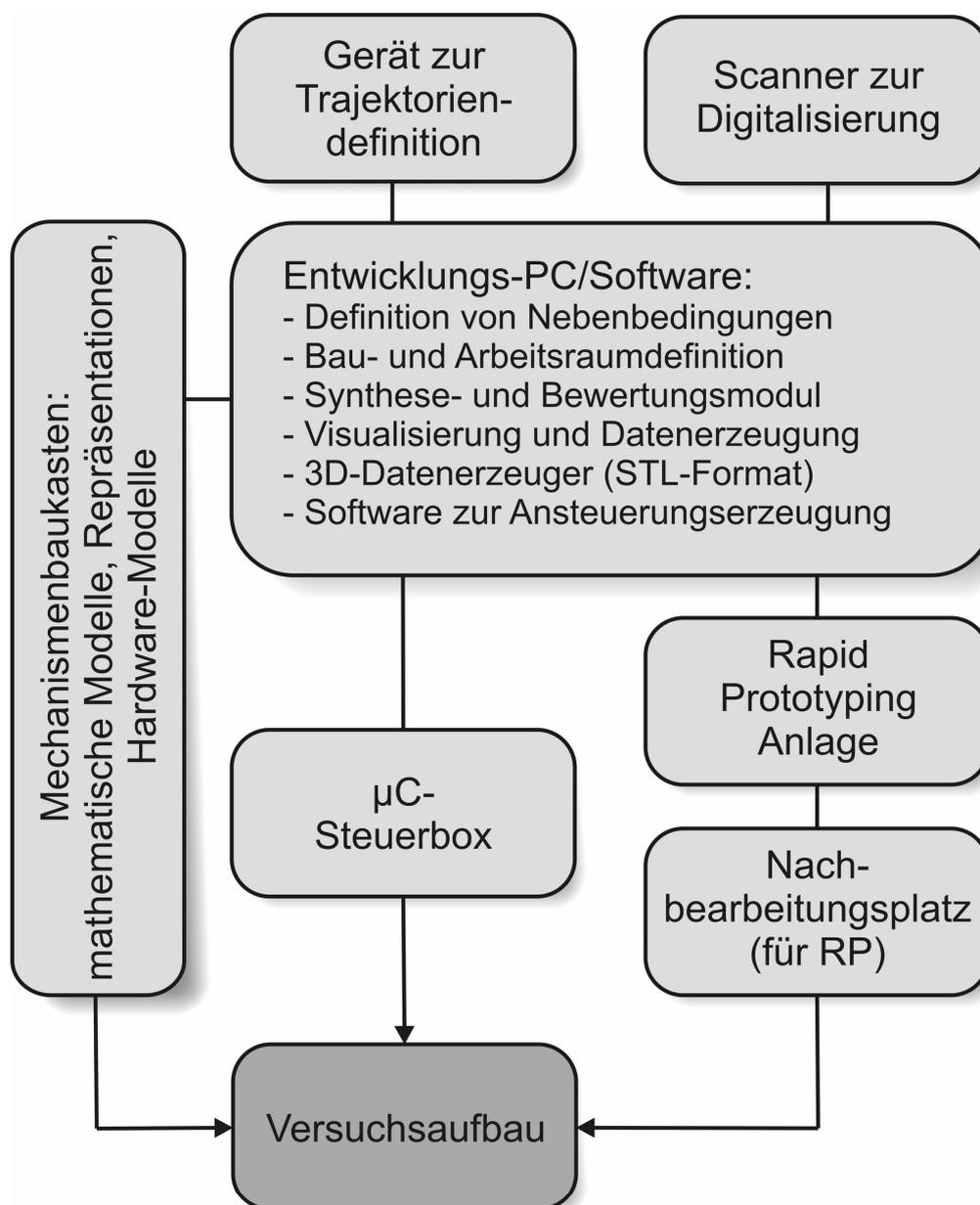


Abbildung 4.3: Statischer Aufbau des Systems zur anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung für Mechanismen und Roboter unter Einsatz modularer Prototypen.

Nachfolgend werden der Mechanismenbaukasten sowie die verwendeten Soft- und Hardwareelemente in ihren Ausprägungen und Eigenschaften näher beschrieben.

#### 4.2.1 Baukasten kinematischer Grundelemente

Der Mechanismenbaukasten bildet die Grundlage der durch Prototypen unterstützten Kinematikentwicklung. Er ist als materieller sowie als rechnerisch abgebildeter Baukasten verfügbar. In seiner Software-Abbildung sind alle für die Entwicklung von Mechanismen verfügbaren Bausteine und Komponenten hinterlegt. Aufgrund der Vielzahl der während unterschiedlichen Entwicklungsschritten zu berücksichtigenden Eigenschaften der Elemente besitzt jedes Element sieben verschiedene Repräsentationen bzw. mathematische Modelle. Diese enthalten jeweils unterschiedliche Eigenschaftsgruppen.

Die Repräsentationen der Elemente sind wie folgt definiert:

- Mathematisches Bewegungsmodell, Übertragungsfunktion
- Geometriemodell mit Hauptabmessungen
- Repräsentation zur Prototypenerstellung: STL-Modell
- Bounding-Box-Darstellung zur Kollisionsvermeidung
- Eigenschaften des Elementantriebs
- Kinetische Eigenschaften des Baukastenelements
- Element-Referenzierungscode

Während der Entwicklung kommen die Repräsentationen an unterschiedlichen Stellen zum Einsatz. Sie werden nachfolgend anhand eines allgemeinen Getriebegliedes mit einem Freiheitsgrad vorgestellt:

##### Mathematisches Bewegungsmodell, Übertragungsfunktion

Speziell für die während der Synthese durchgeführten Berechnungen ist eine Definition der mathematischen Übertragungsfunktion der einzelnen Bauelemente notwendig. Zusätzlich muss neben dem Gelenkfreiheitsgrad der möglichen Bewegung auch die Geometrie des Bauelements beschrieben werden. Sowohl die Geometrie als auch die Bewegung werden anhand homogener Transformationsmatrizen definiert. Da jedes Element per Definition maximal einen Freiheitsgrad besitzen darf, werden jedem einzelnen Element drei Koordinatensysteme für dessen Beschreibung zugeordnet (Abbildung 4.4). Zunächst besitzt jedes Element eine Schnittstelle zum vorhergehenden. Diese bildet das Basiskoordinatensystem des Elements und wird daher mit *base* bezeichnet. Von dort aus wird das darauf folgende Koordinatensystem definiert. Dieses, wiederum körperfeste System *A*, ist abhängig von der Geometrie des Elements, wie beispielsweise dessen Länge oder des durch das Element reali-

sierten Offsets. Die Transformation vom *base*-System in das körperfeste System *A* zur Beschreibung der Geometrie kann zum Beispiel für ein reines Verbindungselement (ohne Gelenkfreiheitsgrad) durch eine reine, eindimensionale Translation  $q_y$  entlang der Längsachse des Elements (*y*-Achse) beschrieben werden:

$${}^{base}\mathbf{T}_A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

Das körperfeste Koordinatensystem *A* beschreibt zusätzlich die Position/Orientierung des im Bauelement enthaltenen Gelenks im Grundzustand. Dies bedeutet bei einem Drehgelenk eine Winkelstellung von  $0^\circ$ . Wird ein Schubgelenk betrachtet, ist damit der vollständig eingefahrene Zustand definiert. Ausgehend hiervon wird wiederum das System *B* beschrieben, dessen Orientierung bzw. Position durch das Gelenk des Bauelements nach dessen Bewegung bestimmt wird. Bei einem reinen Verbindungselement ohne Gelenkfreiheitsgrad ist dieses KOS *B* daher stets deckungsgleich mit dem *A*-System. Bei Betrachtung eines Drehgelenks ist der Gelenkfreiheitsgrad als reine Rotation um die Gelenkachse, deckungsgleich mit den *z*-Achsen der Koordinatensysteme *A* und *B*, definiert. Die Transformation von System *A* zu *B* kann wiederum mittels einer Transformationsmatrix beschrieben werden, welche in diesem Fall eine reine Rotation um die *z*-Achse darstellt:

$${}^A\mathbf{T}_B = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Mit  $\alpha$  ist diese Transformation vom Wert des aktuellen Drehwinkels des Gelenks abhängig, welcher mitunter von den Eigenschaften des Antriebs bestimmt wird und sich in einem definierten Winkelbereich bewegt. Für diesen ergeben sich aufgrund der Motoreigenschaften (siehe nachfolgende Beschreibung der Antriebsrepräsentation) eine minimale Winkelstellung  $\alpha_{min}$  sowie eine maximale Stellung  $\alpha_{max}$ , welche den Wertebereich begrenzen.

Die verwendeten Elementtypen wurden auf Basis einer Untersuchung zum Einsatz unterschiedlicher Kinematikkomponenten im Roboterbau sowie aufgrund der beabsichtigten Minimierung der Teilezahl des Baukastens beschränkt. Dies trägt zu einer Verringerung der Komplexität des Baukastensystems bei. Hiernach sollen zunächst nur die oben bereits genannten einfachen Verbindungselemente ohne Bewegungsfunktion im Baukasten realisiert werden. Mit diesen können beispielsweise Offsets dargestellt werden. Weiterhin wurden Elemente mit entweder einem rotatorischen oder einem translatorischen Freiheitsgrad definiert. Mehr als diese drei Arten von Grundelementen sind für serielle Mechanismen prinzipbedingt nicht notwendig. Alle weiteren Gelenktypen könnten jedoch aus diesen zusammengesetzt werden. Jede

der drei Grundelementgruppen enthält zusätzlich Derivate in unterschiedlicher Länge (siehe geometrische Definitionen).

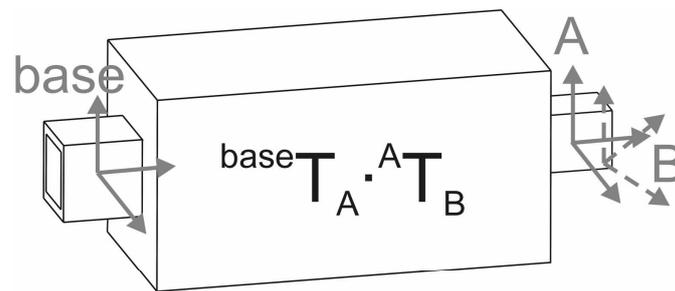


Abbildung 4.4: Darstellung des mathematischen Modells eines allgemeinen Bauteils. Das Element wird durch das *base*-System referenziert. Von dort aus existiert eine Transformation in das *A*-System zur Beschreibung der Geometrie, hin zur Ruhstellung des Bewegungsfreiheitsgrades. Die Bewegung des Gelenkfreiheitsgrades wird von dort aus als Transformation in das *B*-System beschrieben.

Für die Evaluierung des Mechanismus/Roboters während der späteren Synthese ist eine gesamthafte Beschreibung der Kinematik notwendig. Diese erfordert die Zusammenführung der Geometrie- sowie Bewegungsbeschreibungen. Ausgangspunkt der Beschreibung bildet die Referenzierung des Startelements der Kinematik. So wird die Position dessen *base*-Systems ( $base_1$ ) durch eine Transformation im *world*-System der Zielumgebung beschrieben. Nach der Berücksichtigung der Geometrie des ersten Elements ( $^{base_1}T_{A_1}$ ) werden abwechselnd die die Bewegungstransformation  $^{A_i}T_{B_i}$  des jeweiligen Elements *i* bzw. die Geometrietransformation  $^{B_i}T_{A_{i+1}}$  des nachfolgenden Elements angefügt (Abbildung 4.5). Da jeweils das *base*-System eines Elements *i+1* mit dem *B*-System des vorangehenden Elements *i* als deckungsgleich anzusehen sind, können die Transformationen  $^{B_i}T_{base_{i+1}}$  jeweils entfallen. Am Ende der kinematischen Kette erfolgt eine reine Translation vom letzten Element zum tool center point (*tcp*) der Kinematik. Dieser stellt jeweils den betrachteten Frame am Arbeitspunkt des mittels des Roboters bewegten Werkzeugs dar.

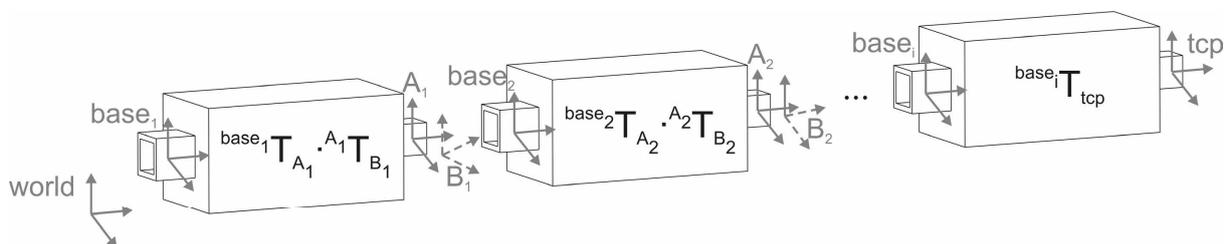


Abbildung 4.5: Darstellung einer Beispielskinematik mit den innerhalb der Elemente zu berücksichtigenden Transformationen. Die Montageposition der Kinematik wird vom Ursprung (*world*) aus referenziert (zu  $base_1$ ). Von dort erstreckt sich die kinematische Kette bis zum Tool Center Point (*tcp*). Aufgrund der Deckungsgleichheit der *base*-KOS mit den *B*-KOS der vorhergehenden Elemente kann für die Berechnung jeweils das *base*-KOS eliminiert werden.

Die Position sowie die Orientierung des *tcp*-Frames können unter Berücksichtigung oben beschriebener Definitionen durch serielle Multiplikation der einzelnen Transformationsmatrizen aus der Bewegung sowie der Geometrie des Mechanismus ermittelt werden:

$${}^{world}\mathbf{T}_{tcp} = {}^{world}\mathbf{T}_{base_1} \cdot {}^{base_1}\mathbf{T}_{A_1} \cdot {}^{A_1}\mathbf{T}_{B_1} \cdot {}^{B_1}\mathbf{T}_{A_2} \cdot {}^{A_2}\mathbf{T}_{B_2} \cdot \dots \cdot {}^{B_{i-1}}\mathbf{T}_{tcp}. \quad (4.3)$$

Neben der Kennzeichnung der Art des Koordinatensystems mittels der Buchstaben *A* und *B* zeigen die Ziffern jeweils die Anordnung des Elements in der kinematischen Kette, bezogen auf das Grundelement *base* zur Befestigung der Kinematik, an.

### Geometriemodell mit Hauptabmessungen

Das Geometriemodell jedes Elements des Kinematikbaukastens beinhaltet dessen geometrische Grunddaten. Diese werden sowohl zur Erstellung der mathematischen Übertragungsfunktion als auch zur Visualisierung der Bauteile benötigt. Hierfür enthält die geometrische Repräsentation der Bauteile, neben den übrigen Abmessungen, als wichtigsten Parameter die Bauteillänge jedes Elements (Abbildung 4.6). Diese wird hier für alle verfügbaren Derivate eines Elements definiert. Dabei können die Bauelementlängen entweder variabel gehalten und anwendungsbezogen definiert, oder aber auch zur Zusammenstellung eines statischen Baukastens bereits vor der Entwicklung auf definierte Größen festgelegt werden.

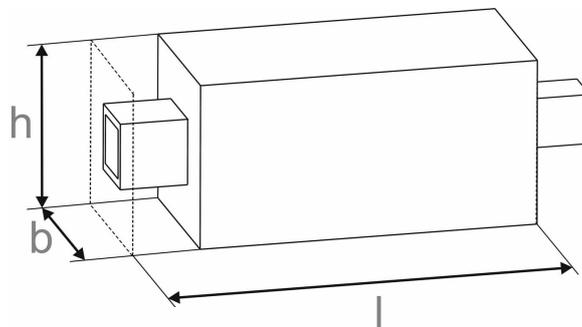


Abbildung 4.6: Die Definition der Geometrie und der realen Bauteilabmessungen, hier dargestellt anhand eines Drehgelenkmodells, basiert auf der Berücksichtigung geometrischer (Grundabmessungen), konstruktiver (montagegerechter Aufbau) sowie technischer (bezogen auf Fertigungsprozess) Faktoren.

Die verbleibenden Abmessungen der Geometrie der Bauelemente werden weiterhin auch durch konstruktive Vorgaben bestimmt. Diese resultieren aus den zu berücksichtigenden Möglichkeiten zur Verbindung der Bauteile, der montagegerechten Konstruktion und der Vermeidung möglicher Kollisionen. Zusätzlich sind technische Randbedingungen zu berücksichtigen. Diese beruhen auf dem verwendeten RP-Fertigungsverfahren zur Erstellung der Prototypen. Hierbei spielen neben dem Fertigungsprozess selbst auch die verwendeten Materialien eine Rolle. Relevant sind hierbei die aufgrund der Fertigungstoleranzen sowie der nach der Fertigung eintretenden Schrumpfung der Bauteile notwendigen Spaltmaße zwischen bewegten Bau-

teilen, benötigte Korrekturfaktoren der Abmessungen oder auch minimal realisierbare Wandstärken der Bauteile. Bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Prozess des 3D-Drucks betragen die minimal möglichen Wandstärken ca. 2 mm. Werden die Wandstärken geringer ausgeführt, ist der Erfolg des Fertigungsprozesses durch die Gefahr des Bauteilbruchs gefährdet (Fischer, et al., 2008). Die Fertigungstoleranzen betragen ca. 0,1 mm. Die genannten technischen Parameter können aufgrund des geringen Einflusses des Anwenders kaum verändert werden. Lediglich durch Verwendung der im Stand der Technik bereits vorgeschlagenen speziellen Routinen zur Gerätekalibrierung (Stopp, et al., 2008), kann hierauf Einfluss genommen werden.

Unter Berücksichtigung der geometrischen, konstruktiven sowie technischen Einflussfaktoren werden die voneinander abhängigen Maßparameter der einzelnen Bauteile definiert. Hierzu zählen unter anderem der Durchmesser von Drehgelenkachsen oder Linearführungen sowie die Abmessungen der Lenker und Anbindungselemente. Von der Festlegung der Abmessungen wird maßgeblich das Gewicht der Bauteile definiert. Dieses muss auf die Leistung der verwendeten Antriebe abgestimmt werden. Der konstruktive Aufbau der Bauelemente und somit auch deren Stabilität hängen wiederum von der Integration der Antriebe ab. Daher muss deren Anbringung im Gegenzug bereits während der Definition der Geometrie berücksichtigt werden.

Die definierten Geometriemodelle können im weiteren Vorgehen zur Visualisierung der erstellten Konzepte am Rechner verwendet werden. Dies trägt zu einer Verbesserung des Systemverständnisses bei. Zudem können sie für nachfolgende Prozessschritte wie die Erstellung von STL-Modellen, die Bauraumvariation (Gelenkdurchmesser) oder für eine spätere Fertigung mit spanenden Fertigungsverfahren verwendet werden.

### **Repräsentation zur Prototypenerstellung: STL-Modell**

Aus den vorab beschriebenen Geometriemodellen kann die dritte Repräsentation der Kinematikelemente abgeleitet werden. Sie besteht aus der Darstellung der Elementgeometrie mittels STL-Dateien (Abbildung 4.7). Diese können von RP-Anlagen zur Fertigung von Bauteilen verwendet werden. Darüber hinaus ist durch deren Import in CAD-Anwendungen eine zusätzliche Möglichkeit zur Visualisierung und Weiterverarbeitung des Entwicklungsergebnisses gegeben.

Die Erstellung von STL-Dateien entspricht wie im Stand der Technik bereits erwähnt dem Aufbau der Oberflächen räumlicher Bauelemente aus einzelnen Dreiecken. Dabei sind deren Anzahl sowie Größe für die Genauigkeit der Modelle von entscheidender Bedeutung. Je höher die Anzahl der vorhandenen Dreiecke und je geringer deren Größe, desto genauer ist das Abbild des Bauelements. Dies entscheidet, besonders beim Bau von Prototypen auch über deren spätere Verwendbarkeit. Da kreisförmige Umrisse von Bauelementen beispielsweise aus mehreren Geraden angenähert werden, erscheinen diese bei zu geringer Genauigkeit als eckig und sind so zur Darstellung von beispielsweise Lagern oder Wellen nicht geeignet. Andererseits

steigt mit der Anzahl der Teilelemente auch der Rechenaufwand. So kann, in Abhängigkeit von der Auflösung der RP-Anlage eine maximal sinnvolle Obergrenze der Auflösung definiert werden. Elemente welche kleiner sind als die durch die Auflösung des Druckers erreichbare Genauigkeit bringen keinen zusätzlichen Nutzen und sind daher zu vermeiden.

Die STL-Modelle der Bauelemente können mit Hilfe einzelner, durch Transformationsmatrizen erzeugter, Punkte aufgebaut werden. Für die Abbildung einer zylindrisch aufgebauten Drehgelenkachse werden so beispielsweise, ausgehend vom Zentrum des Koordinatensystems, die einzelnen Kreispunkte  $P_i$  am oberen sowie  $Q_i$  am unteren Rand eines Zylinders erzeugt. Hierfür werden die aus der Geometriedefinition bekannten Abmessungen wie der Außenradius  $r_{\text{ausßen}}$ , welcher den Radius der Welle darstellt, oder die Lagerlänge  $l_{\text{lager}}$ , welche die Höhe des Lagers darstellt, verwendet. Mittels des Teilungswinkels  $\varphi$ , welcher in  $i$  Schritten von 0 bis  $2\pi$  variiert wird, kann die Genauigkeit der Abbildung definiert werden. Auf Basis dieser Vorgehensweise können zum Beispiel die Punkte am oberen Rand der Drehgelenkachse wie folgt definiert werden:

$$P_i = \begin{pmatrix} r_{\text{ausßen}} \cdot \cos(\varphi_i) \\ r_{\text{ausßen}} \cdot \sin(\varphi_i) \\ \frac{l_{\text{lager}}}{2} \\ 1 \end{pmatrix} \text{ mit } i \in [1; n]. \quad (4.4)$$

Im weiteren Vorgehen können dann aus den oberen und unteren Kreispunkten Dreiecke erzeugt werden, welche die Mantelfläche des Zylinders beschreiben. Dies geschieht durch die jeweilige Kombination der Kreispunkte  $P_i$  und  $P_{i+1}$  mit  $Q_i$  sowie des Punktes  $P_i$  mit  $Q_i$  und  $Q_{i+1}$  zu unterschiedlichen Dreiecken (Abbildung 4.7). Zusätzlich werden die zugehörigen Normalenvektoren der Dreiecke ermittelt. Analog wird mit allen weiteren Flächen der Geometrie verfahren.

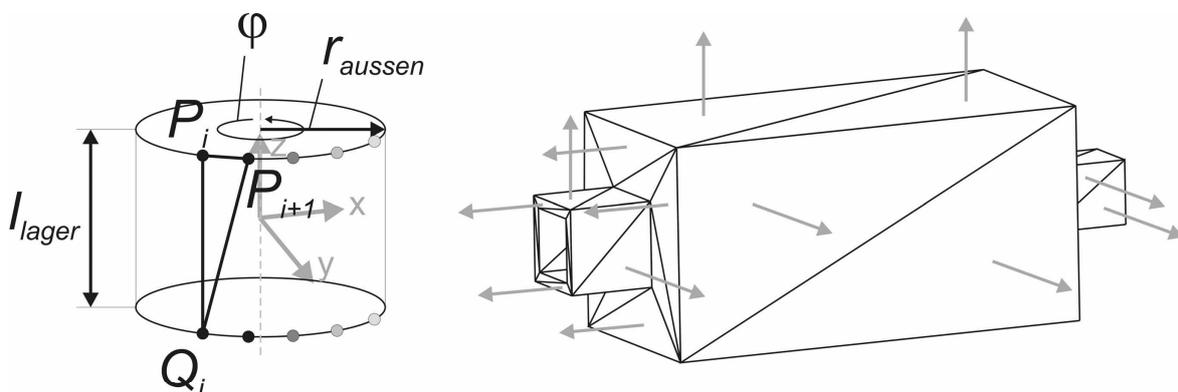


Abbildung 4.7: Bildung der Dreiecke der STL-Datei durch Ermittlung der Geometriepunkte  $P_i$ ,  $P_{i+1}$ ,  $Q_i$  sowie  $Q_{i+1}$  am Beispiel eines Zylinders mit den Abmessungen  $r_{\text{ausßen}}$  sowie  $l_{\text{lager}}$ ; aus den Geometriepunkten erstellte STL-Repräsentation des Beispielbauteils mit Darstellung einer Auswahl von Flächennormalen; linke Bildseite angelehnt an: Fischer, et al. (2008).

## Bounding-Box-Darstellung zur Kollisionserkennung

Eine weitere Repräsentation der Bauteile stellt das Bounding-Box-Modell dar. Dieses dient vor allem der Realisierung einer effizienten Kollisionserkennung während der Bewegungssimulation. Dabei können sowohl Eigenkollisionen als auch Kollisionen mit anderen Gegenständen im Bau- oder Arbeitsraum erkannt werden.

Ziel dieser Repräsentation ist nicht die exakte Abbildung der Geometrie. Innerhalb des Modells werden lediglich die maximalen Außenabmessungen der Bauelemente dargestellt. Diese grobe Darstellung dient einer Reduzierung des Rechenaufwandes während den weiteren Berechnungen, welcher hauptsächlich auf die Verringerung der Anzahl zu berücksichtigender Punkte zurückzuführen ist. Hierdurch wird der Berechnungsvorgang deutlich beschleunigt.

Die Definition der Bounding-Box geschieht ausgehend vom Grundkoordinatensystem *base* des Bauelements. Mittels der Variablen Länge *l*, Breite *b* sowie der Höhe *h* aus dem Geometriemodell ist die Größe des Bauelements definiert. Durch sie sowie den Abstand  $\Delta y$  des *base*-KOS vom vorderen Rand des Elements können nachfolgend die Positionen aller acht Punkte der quaderförmigen Bounding-Box definiert werden (Abbildung 4.8). Die Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  sowie  $P_8$  ergeben sich beispielsweise zu:

$$P_1 = {}^{world}\mathbf{T}_{base} \cdot \begin{pmatrix} -\frac{b}{2} \\ -\Delta y \\ -\frac{h}{2} \\ 1 \end{pmatrix}, P_2 = {}^{world}\mathbf{T}_{base} \cdot \begin{pmatrix} \frac{b}{2} \\ -\Delta y \\ -\frac{h}{2} \\ 1 \end{pmatrix}, P_8 = {}^{world}\mathbf{T}_{base} \cdot \begin{pmatrix} \frac{b}{2} \\ l - \Delta y \\ \frac{h}{2} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4.5)$$

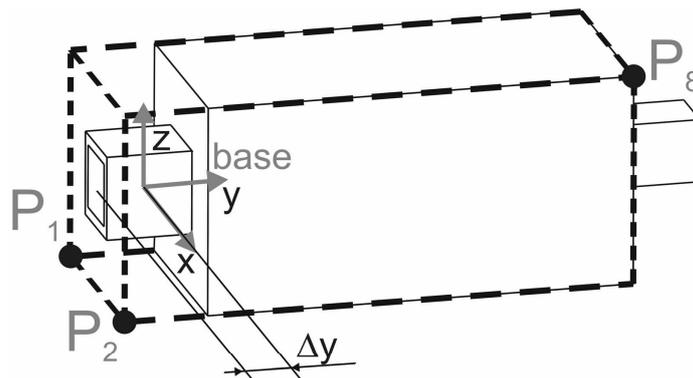


Abbildung 4.8: Bounding-Box-Repräsentation zur Kollisionserkennung, bestehend aus jeweils acht aus den Variablen *l*, *b*, *h* sowie  $\Delta y$  resultierenden Punkten  $P_1$  bis  $P_8$ .

## Eigenschaften des Elementantriebs

Das hier vorgestellte System berücksichtigt nicht nur die Kinematik, sondern auch die Kinetik der entwickelten Mechanismen sowie derer Prototypen. Diese müssen hierfür

mittels Antrieben aktuiert werden. Für die Aktuierung ist eine Festlegung der Eigenschaften der in den einzelnen Bauelementen eingesetzten Antriebe sowie deren Zuordnung zu den Bauelementen notwendig (Abbildung 4.9).

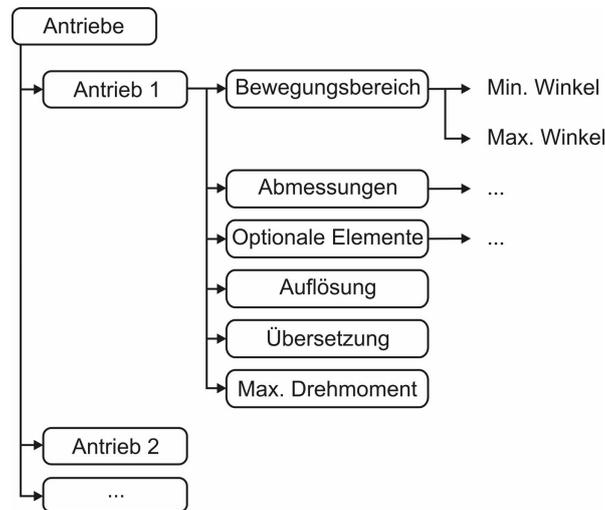


Abbildung 4.9: Darstellung der zu definierenden Eigenschaften des Antriebs eines Elements des Kinematikbaukastens.

Grundsätzlich wurde festgelegt, dass jedes Element maximal einen Antrieb besitzen kann. Die Eigenschaften des jeweilig eingesetzten Antriebs (Gleichstrommotor, Servomotor etc.) sowie der verwendeten Sensoren werden vorab definiert. Ein relevanter Parameter des Motors ist beispielsweise dessen Bewegungsbereich, welcher durch den minimalen Winkel  $\alpha_{min}$  sowie den maximalen Winkel  $\alpha_{max}$  um die Nulllage begrenzt ist. Daneben muss die mittels der Motor-/Sensorkombination erreichbare Auflösung der Bewegung definiert werden, da sich diese auf die notwendige Genauigkeit des späteren Syntheseprozesses auswirkt. Weiterhin werden die Leistungsdaten des Antriebs, wie die erreichbare Winkelgeschwindigkeit sowie die maximale Winkelbeschleunigung, benötigt. In diesem Zusammenhang ist auch das maximal mögliche Drehmoment festzulegen. Die Eigenschaften der Antriebe können, in Abhängigkeit von den übrigen verwendeten Komponenten ein Ausschlusskriterium für eine entwickelte Kinematik darstellen. Dies tritt beispielsweise dann auf, wenn eine gewünschte Bewegung nicht in der vorgegebenen Zeit erfüllt werden kann.

Weiterhin müssen die in einer Antriebskombination verwendeten zusätzlichen Bauelemente definiert werden. So kann die Verwendung einer Antriebsart beispielsweise die Integration einer Bremse oder aber auch eines Getriebes erfordern. Die Anzahl dieser integrierten Komponenten wirkt sich wiederum auf die Komplexität der verwendeten Aktorik, welche möglichst gering gehalten werden soll, aus. In diesem Sinne ist auch darauf zu achten, für möglichst alle Elemente des Baukastens dieselben Antriebe oder zumindest dieselbe Antriebsart zu verwenden. Dies ermöglicht unter Anderem die Verwendung einheitlicher Montagekonzepte. Werden neben den Antrieben zusätzlich Getriebe verwendet, so ist die Kraft- bzw. Wegübertragung des Motors auf die Kinematik in Abhängigkeit von diesen Getrieben zu definieren. Hierdurch kann die notwendige Antriebsansteuerung unter Berücksichtigung der festen

Übersetzungsverhältnisse, z. B. bei Verwendung von Zahnradgetrieben, oder der Übersetzungsverläufe (z. B. bei Gelenkgetrieben) festgelegt werden.

### Kinetische Eigenschaften der Baukastenelemente

Durch die Definition weiterer Eigenschaften der verwendeten Bauelemente des entwickelten Mechanismus/Roboters kann dessen Kinetik nicht nur mittels des Prototyps erfahren, sondern auch rechnerisch ermittelt werden. Die Bestimmung der Massen sowie der Massen- und Flächenträgheitsmomente der einzelnen Elemente ermöglicht so die Ermittlung der auftretenden Kräfte und Verformungen bzw. der notwendigen Kräfte zur Bewegung der Kinematik (Abbildung 4.10). Hierdurch können die notwendigen Drehmomente und Leistungen der Antriebe abgeschätzt werden. In den nachfolgend aufgezeigten Modellen wird nur ein vordefinierter Antrieb verwendet, dessen Eigenschaften somit in den *Eigenschaften des Elementantriebs* bereits festgelegt sind und nicht angepasst werden können. Jedoch ist die Kenntnis der kinetischen Daten dennoch für eine spätere Übertragung des Entwicklungsergebnisses auf einen mit herkömmlichen Mitteln angefertigten Mechanismus/Roboter hilfreich.

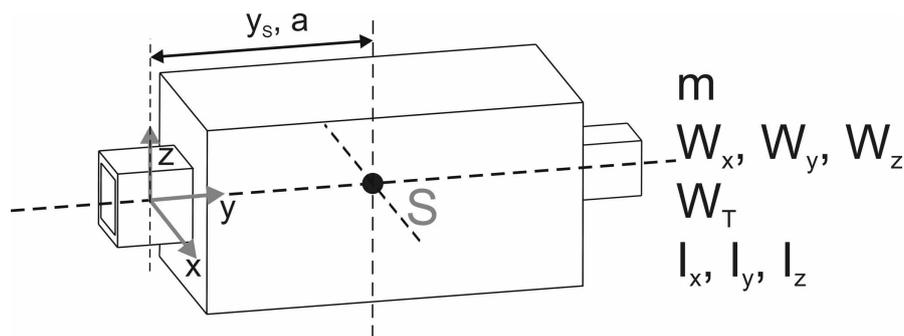


Abbildung 4.10: Auf die kinetischen Eigenschaften des Baukastenelements einwirkende Faktoren: zu beschleunigende Masse, Flächen- und Widerstandsmoment.

Neben diesen Daten zur Definition des Antriebs könnten auch die aus der Bewegung resultierenden Fliehkräfte bestimmt werden. Unter Kenntnis der Bauteil- und Lagertoleranzen könnten so mögliche Verschiebungen der Bauteile während der Bewegung ermittelt werden. Hierdurch können mögliche Ungenauigkeiten bei der Bahnerfüllung vorab aufgedeckt werden.

### Element-Referenzierungscode

Jedem einzelnen Element des Kinematikbaukastens sind die oben aufgezeigten Repräsentationen zugeordnet. Sie werden jeweils zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Entwicklungsprozesses benötigt. Um einen korrekten Bezug der Repräsentationen zu den Elementen sicher zu stellen, ist eine klare Zuordnung notwendig. Hierzu soll eine Codierung verwendet werden. Diese beinhaltet zunächst die Position des referenzierten Elements (Drehgelenk, Schubgelenk etc.) in der Kinematik sowie des-

sen grundlegende Eigenschaften. Ausgehend vom Referenzierungscode soll auf die oben beschriebenen Repräsentationen der Bauelemente zugegriffen werden können (Abbildung 4.11), in welchen deren Basisdaten hinterlegt sind. Darüber hinaus können unter dem Punkt *Sonstige Eigenschaften* weitere Daten der Elemente abgelegt werden. Hierzu zählen z. B. die bei der Fertigung des betreffenden Elements auftretenden Kosten. Derartige nicht-technische Daten können bei der späteren Bewertung von Mechanismen/Robotern mit in Betracht gezogen werden.

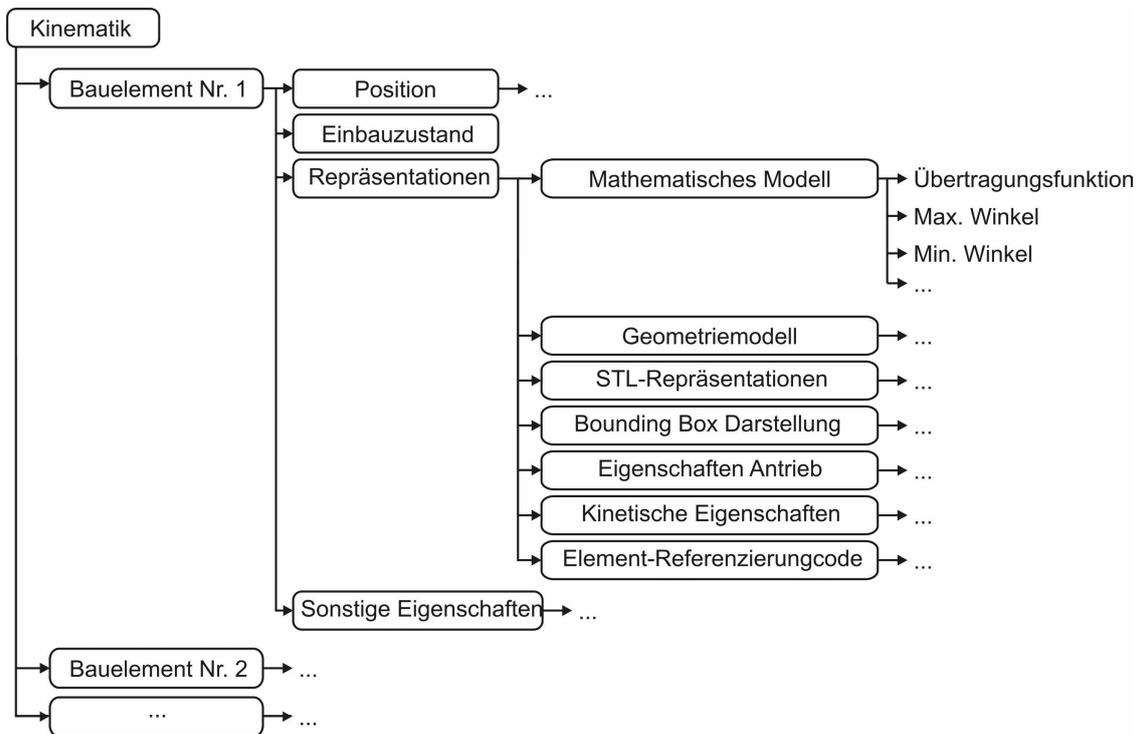


Abbildung 4.11: Zugriff auf ein Baukastenelement mittels eines Element-Referenzierungs-codes: über diesen soll auf Daten zum Einbauzustand, der Position sowie auf die Repräsentationen des Elements zugegriffen werden können.

## 4.2.2 Hardware-Komponenten

Das beschriebene System zur anwendungsspezifischen Entwicklung von Kinematiken unter Einsatz modularer Prototypen verwendet neben dem grundlegenden Modell des Mechanismenbaukastens, sowie den aus diesem abgeleiteten materiellen Bauelementen, zusätzliche Hardware-Komponenten. Diese werden eingesetzt, um die Entwicklung möglichst intuitiv und, durch die Definition von Randbedingungen, angepasst an die aktuelle Situation durchführen zu können. Darüber hinaus dienen sie der anschaulichen Ausgabe der Ergebnisdaten.

### Entwicklungs-Rechner mit Peripheriegeräten

Das zentrale Element zur Durchführung der Synthesaufgabe bildet ein Entwicklungsrechner mit Standard-Peripheriegeräten (Tastatur, Maus etc.). Auf diesem ist der Mechanismenbaukasten hinterlegt. Darüber hinaus wird auf diesem Rechner die

Entwicklungssoftware zur Kinematiksynthese und Steuerungserzeugung (siehe Kapitel 4.2.3) ausgeführt. Zusätzlich stellt er auch die Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Hard- und Softwarekomponenten des Entwicklungsarbeitsplatzes dar. Über seine Ein- und Ausgänge (z. B. USB, RS232) ist der Entwicklungsrechner mit den Eingabegeräten wie dem Scanner sowie einem Gerät zur Bahneingabe verbunden. Weiterhin wird durch ihn die Anbindung der Ausgabegeräte realisiert. So erfolgt die Verknüpfung mit der verwendeten RP-Anlage rein über den Austausch von STL-Dateien. Die Steuerbox zur Ausgabe des Ansteuerungscodes wird mittels eines Mikrocontroller-Programmieradapters mit dem Rechner verbunden.

### **Rapid-Prototyping-Anlage mit Nachbearbeitungsplatz**

Zur Erstellung der laut einer Definition von Gebhardt (2003) angefertigten Funktionsmodelle und Prototypen wird eine RP-Anlage verwendet. Diese muss in der Lage sein, die im STL-Format erstellten 3D-Daten verarbeiten zu können. In der vorliegenden Arbeit ist hierfür ein 3D-Drucker vorgesehen. Das zum Aufbau der Kinematiken verarbeitete Material bzw. das daraus entstehende Endprodukt muss eine ausreichende Stabilität und Steifigkeit aufweisen. Nur so kann garantiert werden, dass die Prototypen den während des Betriebs auftretenden Belastungen standhalten können. Diese resultieren aus den Kräften bzw. den Durchbiegungen, welche aufgrund des Eigengewichts oder externer Einflüsse (statische und dynamische Lasten) entstehen. Die notwendige Stabilität wird durch nachträgliche Infiltration der Bauelemente sowie durch eine belastungsangepasste Auslegung der Elemente des Mechanismenbaukastens erreicht.

Trotz des beschränkten verfügbaren Arbeitsraumes vieler RP-Anlagen muss eine hinreichende Größe zur Fertigung aller parametrisiert ausgegebenen Bauteile sicher gestellt sein. Zwar können auch nach unten skalierte Funktionsmodelle der entwickelten Kinematik angefertigt werden, jedoch ist aufgrund der Größen der zusätzlichen Anbauteile (z. B. der fallspezifisch verwendeten Antriebe) eine Größenbegrenzung nach unten vorgegeben. Hierbei muss unter anderem die Verhältnismäßigkeit der Größen der einzelnen Bauteile sicher gestellt sein. Weiterhin wirken sich bei geringer Bauteilgröße auftretende Fertigungsungenauigkeiten der Prototypenteile hinsichtlich Form- und Maßtoleranzen stärker aus. Dem soll mit Hilfe oben bereits erwähnter Kalibrierungsverfahren entgegen gewirkt werden. Durch deren Anwendung kann auch der Aufwand zur Nachbearbeitung der Bauteile verringert werden, wodurch wiederum eine schnellere Fertigstellung der Prototypen ermöglicht wird. Ist eine Nachbearbeitung der Bauteile zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit dennoch notwendig, soll hierzu ein einfacher Prozess verwendet werden, um das Risiko der Zerstörung der Bauteile möglichst gering zu halten. So geschieht die Nachbearbeitung lediglich manuell durch das Entgraten oder Schleifen der Bauteile.

Aufgrund der Ausgestaltung der Bauelemente ist ein beim 3D-Druck während des Druckprozesses ohnehin schwer zu realisierendes Einlegen von Komponenten (z. B.

Lager etc.) in die Bauelemente nicht erforderlich. Dies kann in nachfolgenden Prozessen geschehen.

Um eine effiziente Nutzung der mit Prototypen unterstützten Entwicklung garantieren zu können, muss eine schnelle Verfügbarkeit der RP-Anlage vor Ort sowie eine einfache Bedienung, oder aber auch die Bereithaltung standardisierter und vorab gefertigter Baukastenelemente, gewährleistet sein. Nur so kann die Möglichkeit des schnellen Prototypenaufbaus durch jeden Entwickler genutzt werden.

### Mikrocontroller-Steuerbox

Für die Ansteuerung der Antriebe der Prototypen sind zwei Konzepte denkbar. So kann das entwickelte System zum einen direkt über eine Online-Kommunikation vom Entwicklungsrechner aus angesteuert werden. Zum anderen kann die für die Bewegung notwendige Information zunächst an ein separates Steuerungssystem übertragen werden, von wo aus daraufhin ein eigenständiges Abfahren der Bewegung gesteuert werden kann. Nachfolgend wurde die letztere Methode verwendet, da diese unter anderem Vorteile durch den geringeren Aufwand der Systemkommunikation bietet. Hierfür muss eine separat aufgebaute Mikrocontroller-Steuerbox zwischen den Entwicklungsrechner sowie den Kinematikprototyp geschaltet werden. Zusätzlich muss eine Verbindung mit einer externen Spannungsversorgung erfolgen (Abbildung 4.12).

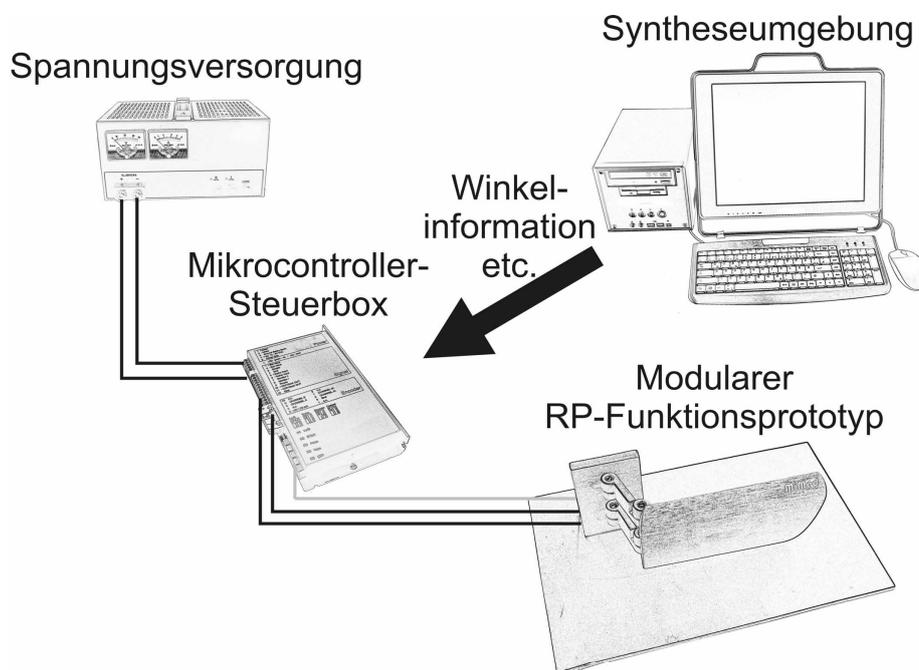


Abbildung 4.12: Die Ausleitung der Ansteuerungsinformation aus der Syntheseumgebung erfolgt durch die Programmierung der Mikrocontroller-Steuerbox. Von dieser getriggert kann der erzeugte Mechanismus/Roboter aktiviert werden.

Die Steuerbox muss den Anschluss einer möglichst großen Anzahl von Antrieben gewährleisten. Für die beispielhafte Entwicklung von Kinematiken für 3D-

Bewegungen mit reiner Positionserfüllung ist eine Anbindung von drei Antrieben vorgesehen. Die materiellen Anbindungen müssen eine einfache und (verwechslungs-) sichere Verbindung zu den Antrieben garantieren. Daneben muss die Steuerbox, z. B. bezüglich der Anzahl der Steuerleitungen, der Versorgungsspannung etc., hinsichtlich der im Mechanismenbaukasten verwendeten Antriebsart ausgelegt sein. Die Leistungsfähigkeit der Steuerbox muss sowohl im Hinblick auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit als auch auf die zur Übergabe der Bahninformationen notwendige Größe des Speicherplatzes abgestimmt sein. Um eine einfache und sichere Bedienung der Steuerbox gewährleisten zu können sind in diese Benutzerschnittstellen zu integrieren, welche unter anderem eine Möglichkeit zum Start sowie zum Beenden des gesteuerten Betriebs des Mechanismus/Roboters bieten. Darüber hinaus ist eine Notaus-Funktion für den sicheren Betrieb der Prototypen vorgesehen.

Für die Programmierung des in der Steuerbox enthaltenen Mikrocontrollers mittels des Entwicklungsrechners ist vor allem auf gute Zugänglichkeit der hierfür notwendigen Schnittstellen zu achten.

### **4.2.3 Software-Komponenten**

Das beschriebene System zur anwendungsspezifischen Entwicklung von Kinematiken unter Verwendung von Prototypen benötigt neben dem fundamentalen theoretischen Modell des Mechanismenbaukastens und den mechanischen Komponenten zusätzlich Software-Bausteine. Diese werden eingesetzt, um die Entwicklung möglichst angepasst an die aktuelle Situation, d. h. die vorgegebenen Randbedingungen, durchführen zu können. Darüber hinaus dienen sie der Datenverarbeitung und der Ausgabe der Ergebnisdaten. Zu den Software-Komponenten zählen Module zur Definition von Nebenbedingungen und Bahnvorgabe sowie zur Bau- und Arbeitsraumdefinition. Daneben werden das Kinematiksynthese- und Bewertungsmodul, das Visualisierungs- und 3D-Datenerzeugungsmodul sowie das Modul zur Ausgabe der Ansteuerungssoftware für die Hardware-Prototypen benötigt.

#### **Modul zur Definition von Nebenbedingungen und Bahnvorgabe**

Diese Software-Komponente enthält hauptsächlich Möglichkeiten zur Eingabe von Randbedingungen, welche eine Grundlage für die durchgeführte Synthese darstellen. So werden für die spätere Variation der Kinematik beispielsweise die zulässigen Arten der Getriebeglieder sowie deren maximal zulässige Anzahl festgelegt. Weiterhin können die Schrittweiten späterer Variationen definiert werden. Hierdurch kann die Genauigkeit der Berechnungen beeinflusst werden.

Eine weitere wichtige Grundlage der angepassten Kinematikentwicklung stellt die Vorgabe der gewünschten, zu realisierenden Bewegungsbahn des Mechanismus/Roboters dar. Diese hat möglichst anwendungsspezifisch und im Bezug auf das Zielsystem zu geschehen. Daher soll hierzu die bereits im Stand der Technik vorgestellte und von Richter, et al. (2009) vorgeschlagene anschauliche Möglichkeit zur

Realisierung einer Trajektorienvorgabe angewendet werden. Neben der Verwendung des Industrieroboters könnte dieses Verfahren auch hinsichtlich des Einsatzes anderer Eingabegeräte für 3D-Bahnen, der Verwendung von Messgeräten (z. B. FaroArm, FARO Technologies, Inc.) oder auch optischer Kamerasysteme zur Verfolgung von Gegenständen angepasst werden. Durch den direkten Einsatz der Werkzeuge im Zielsystem wird eine anwendungsspezifische Trajektorienbeschreibung, so beispielsweise für ein chirurgisches Instrument vor Ort im OP, ermöglicht (Abbildung 4.13).

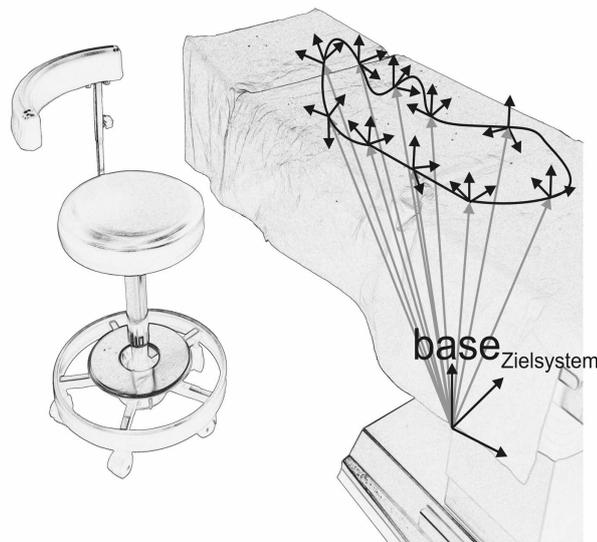


Abbildung 4.13: Anwendungsspezifische Beschreibung einer aus zeitlich nacheinander folgenden Frames bestehenden Trajektorie, z. B. eines chirurgischen Instruments, mit direktem Bezug auf das Zielsystem  $base_{Zielsystem}$ . Dieses stellt hier beispielsweise eine OP-Liege dar.

Die darin enthaltenen Frames stellen eine Vorgabebahn aus diskreten, nicht gleichmäßig verteilten Stützpunkten dar. Die Genauigkeit der Bahnkurve ist abhängig von der Taktung der Aufnahme der einzelnen Bahnpunkte. In Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit während der Aufnahme können die Bahnpunkte entlang der Vorgabebahn unterschiedlich dicht verteilt sein. Dies kann nachfolgend zur Gewichtung wichtiger Bahnabschnitte verwendet werden. Basiert die Häufung der Frames jedoch lediglich auf unterschiedlichen, unbeabsichtigten Eingabegeschwindigkeiten, hat eine Anpassung der Trajektorie zu erfolgen. Diese sollte dann in gleich lange Bahnabschnitte aufgeteilt werden. Hierzu können unterschiedliche Verfahren verwendet werden. Zum einen kann eine Annäherung der Trajektorie durch Geraden, welche aus der Verbindung zwischen den einzelnen Trajektorienpunkten gebildet werden, erfolgen. Andererseits kann sie jedoch auch mit Hilfe interpolierter Kurven bzw. auch Splines angenähert werden.

Aufgezeigt für ein zweidimensionales Beispiel werden bei beiden Varianten nach der Annäherung, z. B. mittels einer Aneinanderreihung mehrerer Geraden  $R(u_i)$ , gleich lange Strecken entsprechend der gewünschten Anzahl von Frames ( $n_{frames}$ ) über der Gesamtlänge der Aneinanderreihung  $l_{Reihe}$  abgetragen. Die jeweiligen Endpunkte der abgetragenen Geraden an den Positionen  $u_i$  werden als Grundpunkte neuer Frames

definiert (Formel (4.5)). So wird eine gleichmäßige Verteilung der Frames entlang der angenäherten Trajektorie erreicht. Die Position der Aufpunkte der Frames ( $P_{xi}, P_{yi}$ ) im kartesischen Koordinatensystem wird anhand der Aneinanderreihung der Geraden definiert (Formel (4.6)). Neben den Aufpunkten muss zusätzlich die Ausrichtung  $\alpha_i$  der neu erhaltenen Frames berechnet werden. In dem in Abbildung 4.14 aufgezeigten Beispiel geschieht dies durch Interpolation zwischen den Winkeln  $\alpha_{pre}$  und  $\alpha_{sub}$  der vorangegangenen sowie der nachfolgenden Frames mittels Formel (4.7). Dabei stellen  $u_{pre}$  sowie  $u_{sub}$  jeweils die Positionen der voran gegangenen bzw. der nachfolgenden, ursprünglich aufgenommenen Frames dar.

$$u_i = \frac{l_{Reihe}}{n_{frames}} \cdot i; \quad i \in \{0 \dots n_{frames} - 1\}; \quad u_i \in Reihe. \quad (4.5)$$

$$\begin{pmatrix} P_{x_i}(u_i) \\ P_{y_i}(u_i) \end{pmatrix} = R(u_i). \quad (4.6)$$

$$\alpha_i = \alpha_{pre} + (\alpha_{sub} - \alpha_{pre}) \cdot \frac{u_i - u_{pre}}{u_{sub} - u_{pre}}. \quad (4.7)$$

Sollen einzelne Frames explizit gewichtet werden, kann ein zusätzlicher Parameter zur Festlegung der Relevanz von Bahnpunkten oder -abschnitten für die spätere Bewertung eingeführt werden. Dies führt während des weiteren Synthesevorgehens zu einer Verbesserung der lokalen Bahnerfüllung in höher gewichteten Bereichen der Trajektorie.

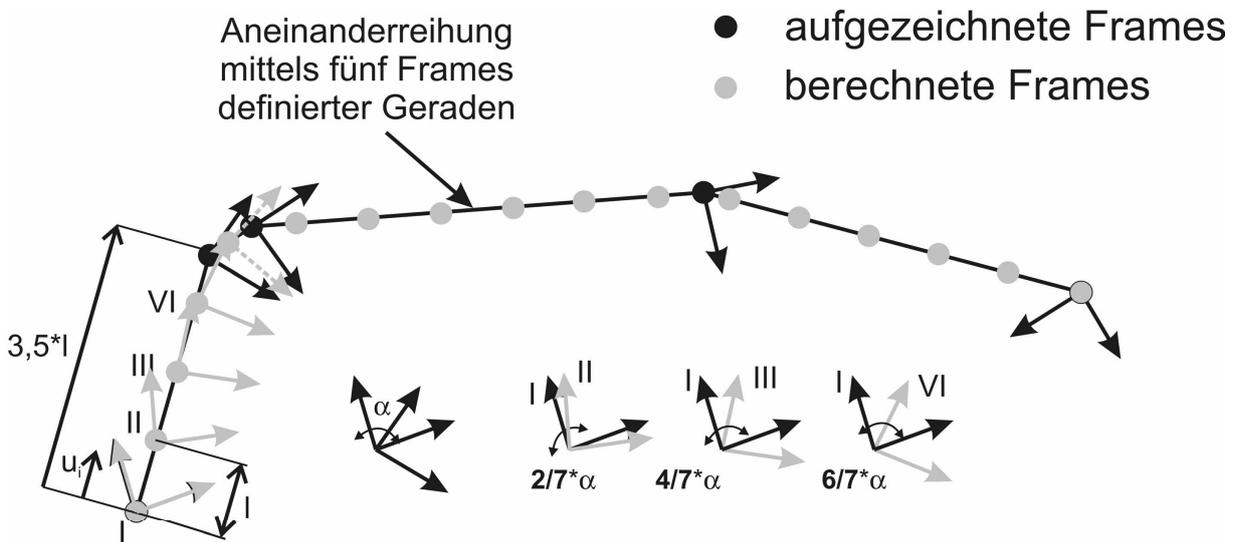


Abbildung 4.14: Überführung einer zweidimensionalen Bewegungsbahn beliebig aufgezeichneter Frames in eine Trajektorie gleichmäßig verteilter Frames. Das Vorgehen basiert auf einer Annäherung der Bewegungsbahn mittels Geraden und deren darauf folgender Aufteilung in Stücke gleicher Länge.

## Modul zur Bau- und Arbeitsraumdefinition

Um die Kinematiksynthese aufgabenspezifisch durchführen zu können, ist eine Abstimmung auf das Umfeld der zu lösenden Bewegungsaufgabe, das Zielsystem, notwendig. Diese soll unter anderem durch eine bereits in der Synthese enthaltene Berücksichtigung der verfügbaren Bau- und Arbeitsräume realisiert werden. Die hierfür notwendige Datenermittlung kann, in Abhängigkeit von der bereits vorhandenen Systeminformation und dem Entwicklungsstand des betrachteten Gesamtsystems, auf mehrere Arten erfolgen. So soll zwischen einer manuellen Bau- und Arbeitsraumdefinition durch die Eingabe von Koordinaten, der Verwendung von Konzeptskizzen sowie der Verarbeitung von STL-Daten (binär/ASCII) des betrachteten Systems ausgewählt werden können.

Für frühe Entwicklungsphasen ist neben der abstrakten Definition durch Koordinateneingabe die Möglichkeit der Verwendung von Konzeptskizzen vorgesehen. Hierfür sollen vorhandene Handskizzen nach ihrer Erstellung zunächst mittels eines Scanners digitalisiert werden. Daraufhin sollen anhand der entstandenen Bilddatei (z. B. JPG) am Rechner interaktiv zweidimensionale Bauräume ausgewählt werden. Diese werden als Polygonzüge in der Syntheseumgebung hinterlegt (Abbildung 4.15).

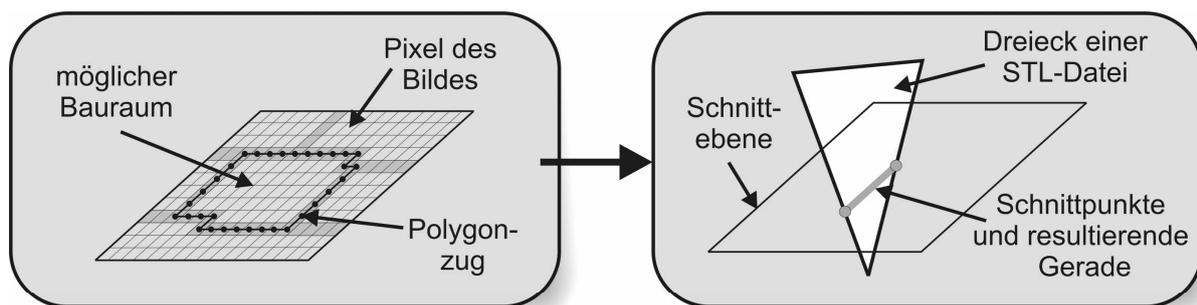


Abbildung 4.15: Definition zweidimensionaler Bauräume mittels einer Skizze durch Bilden von Polygonzügen; analog Bauraumdefinition durch Schneiden der Dreiecke einer STL-Datei hier am Beispiel des Schnitts eines einzelnen Dreiecks.

Ist die Systementwicklung bereits weiter fortgeschritten, werden die Baurauminformationen durch Einlesen von 3D-Geometriedaten im STL-Format (binary oder ASCII) gewonnen. Diese können, verglichen mit anderen Darstellungsarten (Bounding-Boxes, Voxel), direkt aus CAD-Systemen ausgeleitet werden. Zur Erstellung zweidimensionaler Bauräume muss der Querschnitt der vorhandenen Struktur als zweidimensionale Fläche ermittelt werden. Dazu wird die eingelesene 3D-Geometrie in der gewünschten Höhe und Ausrichtung (z. B. parallel zur Erdoberfläche,  $x/y$ -Ebene) mit einer Ebene geschnitten. Dieser Schnitt durch die Geometrie wird auf viele Einzelschnitte der Dreiecksseiten oder Dreieckspunkte der STL-Daten mit der Schnittebene zurückgeführt. Die Aneinanderreihung der Strecken zwischen jeweils zwei Schnittpunkten bildet wiederum Polygonzüge, welcher die Begrenzungen der Geometrie darstellen. Aus diesen kann wiederum der zweidimensionale Bauraum ausgewählt werden. Im ausgewählten Bauraum zusätzlich enthaltene Polygonzüge sollen auto-

matisch anhand der Normalenvektoren der Dreiecke als Material erkannt und somit für das weitere Vorgehen als Sperrfläche (belegte Fläche) definiert werden.

Als Erweiterung könnten zur Berücksichtigung eines dreidimensionalen Bauraums mehrere parallele Ebenenschnitte durchgeführt werden. Hiermit wird eine Erweiterung der Variationsmöglichkeiten zur Gelenkplatzierung auf Volumina erreicht. Eine vollständige dreidimensionale Beschreibung des Variationsraumes würde mit einer deutlichen Erhöhung des Rechenaufwandes einhergehen und wurde daher nicht durchgeführt.

Die beschriebenen Vorgehensweisen zur Bauraumdefinition können weiterhin auch zur Definition von Arbeitsräumen (Verbrauchsflächen) bzw. darin befindlicher Hindernisse verwendet werden. Hierdurch würde die Implementierung einer Kollisionserkennung ermöglicht, mit welcher bereits bei der Variation des Mechanismus (sowohl Geometrie als auch Bewegung) während der Synthese stets eine Detektierung von Kollisionen der Kinematik mit einer Hinderniskontur durchgeführt werden kann. Nicht zielführende Mechanismen und Konfigurationen können so direkt und frühzeitig ausgeschlossen werden. Hierdurch können die Vorteile der angepassten Kinematikentwicklung auf Basis der Definition von Randbedingungen und der simultanen Kinematik- und Steuerungsentwicklung noch effizienter genutzt werden.

### **Kinematiksynthese- und Bewertungsmodul**

Zur Synthese und Bewertung serieller Kinematiken wird eine einfache Methode, basierend auf einer Routine zur iterativen Variation von Startparametern einer Kinematik verwendet. Geeignete Parameter zur Variation sind die Position von Anlenkpunkten im Bauraum, die Art und Anzahl der Gelenke sowie die Lenkerlängen in Abhängigkeit von den im Mechanismenbaukasten vorhandenen Modulen. Weiterhin kann eine Kombination verschiedener Bauelemente sowie eine Variationen derer Ansteuerung durchgeführt werden. So werden sowohl unterschiedliche Kinematiken als auch verschiedene Systemzustände (Ansteuerungsarten) in die Entwicklung mit einbezogen.

Während der Variation der einzelnen Parameter werden stets die durch den tool center point (*tcp*) der dann aktuellen Konfiguration erreichten Frames (Position, Orientierung) ermittelt. Durch eine Anpassung der Auflösung der Parametervariation kann die Genauigkeit der Berechnungen eingestellt werden. Hierdurch wird jedoch auch die Rechenzeit beeinflusst.

Die vorgesehene Parametervariation läuft in drei, ineinander verschachtelten Hauptvariationsschritten ab (Abbildung 4.16):

- In einem ersten Schritt erfolgt eine Überprüfung der Zielerfüllung bei festgelegter Anfangskonfiguration mit Hilfe unterschiedlicher Ansteuerungsmöglichkeiten. Die Lenkerlängen und -anordnungen sowie die Position des ersten Gelenks im Bauraum bleiben dabei konstant. Jeweils die Gelenk-

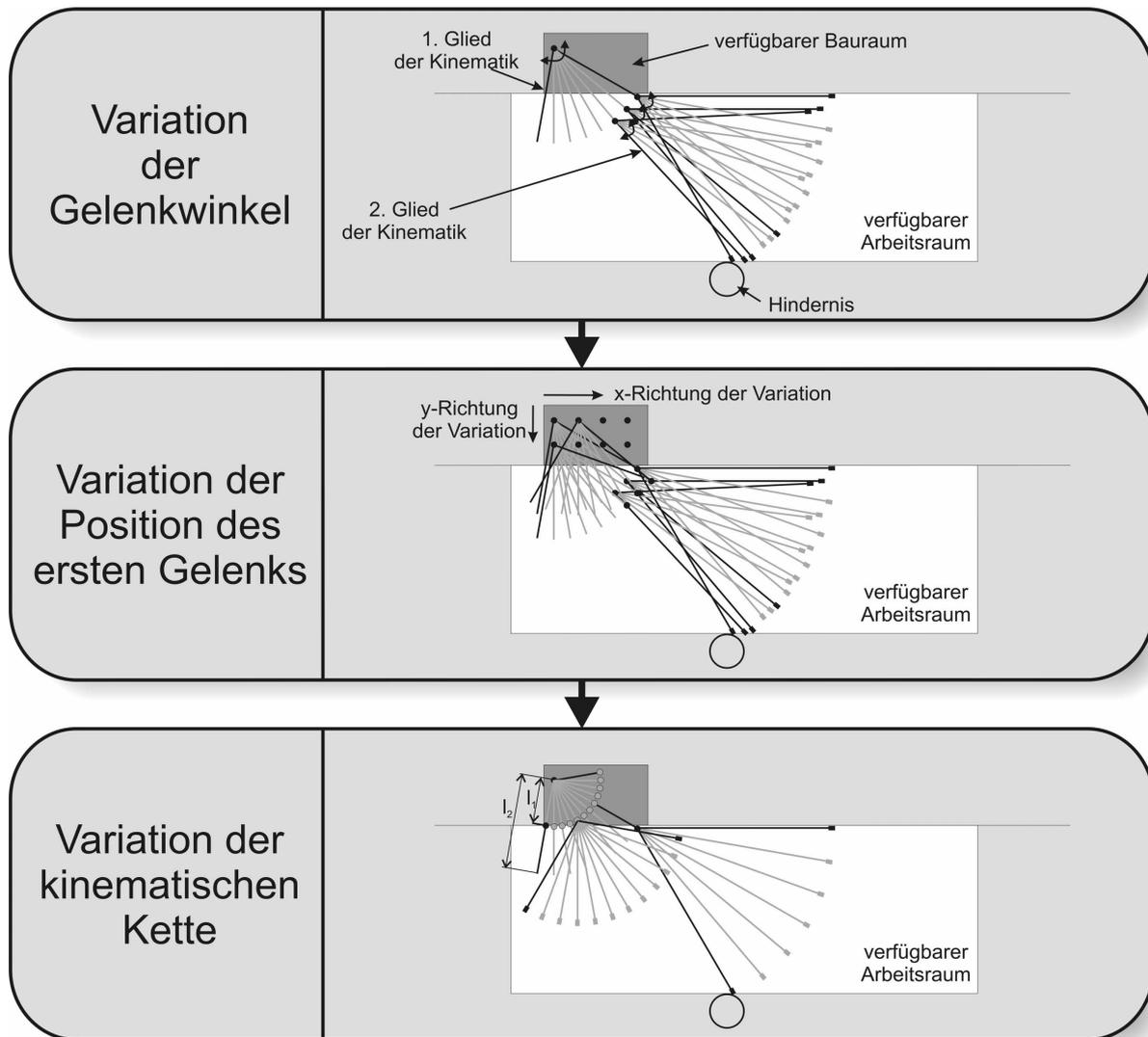


Abbildung 4.16: Iteratives Vorgehen während der Parametervariation der Synthese: Bewegungsvariation, Variation der Position des ersten Gelenks sowie Modifikation der kinematischen Kette ( $l_1$ ,  $l_2$  entsprechen der Länge des ersten Lenkers vor bzw. nach der Modifikation).

stellungen der Drehgelenke sowie die Verfahrspositionen der Schubgelenke werden iterativ variiert. Da hieraus meist eine noch unzureichende Übereinstimmung mit der Zielvorgabe resultiert, erfolgt daraufhin der nächste Variationsschritt.

- In diesem zweiten Schritt erfolgt die Variation der Position des ersten Gelenkes im Bauraum. Hierzu werden während der Definition der Bauräume mit Hilfe eines Rasters bereits festgelegte Anlenkpunkte verwendet. Die Anfangskonfiguration der Kinematik wird bei dieser Variation beibehalten, die Gelenkwinkel werden wiederum variiert.
- Wird auch nach den vorangegangenen Variationen eine hinreichende Übereinstimmung der erhaltenen Kurve mit der Vorgabekurve nicht erreicht, erfolgt in einem nächsten Schritt die Anpassung der Geometrie. Die

vorgegebene kinematische Kette, d. h. die Lenkerlängen, deren Anordnung sowie die im Roboter bzw. Mechanismus enthaltenen Gelenke werden nach den im Baukasten vorgegebenen Möglichkeiten variiert.

Nach jeder durchgeführten Variation soll die Zielerfüllung überprüft werden. Dies kann hinsichtlich verschiedenster Kriterien sowie zugehöriger Gewichtungen erfolgen. Die Kriterien könnten beispielsweise in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Erfüllung der Bewegungsaufgabe (Position, Orientierung)
- Kinematische Eigenschaften (Übertragungswinkel etc.)
- Kinetische Eigenschaften (Ansteuerungseigenschaften etc.)
- Weitere Kriterien (Kosten etc.)

Während der nachfolgenden Realisierung wurde die Berücksichtigung der Kriterien zunächst auf die Erfüllung der Aufgabenstellung beschränkt. Werden jedoch mehrere Kriteriengruppen verwendet, kann in Abhängigkeit von deren, durch den Anwender festgelegten Relevanz für die aktuelle Anwendung eine individuelle, gewichtete Zielfunktion mit dem zugehörigen Qualitätswert  $Q_{total}$  erstellt werden. Dieser enthält dann alle Qualitätswerte  $Q_i$  der Kriteriengruppen (z. B.  $Q_{motion}$ , Erfüllung der Bewegungsaufgabe) sowie deren Gewichtungen  $w_i$ .

Die Kriteriengruppe der Erfüllung der Bewegungsaufgabe bewertet die Übereinstimmung der erzielbaren mit der vorgegebenen Trajektorie. Zur Ermittlung dieser Übereinstimmung wird jedem der gleich verteilten Frames der vordefinierten Trajektorie ein bestmöglich übereinstimmender, mittels der aktuellen Konfiguration (definiert durch den Montageort, Lenkerlängen, Elementkombination), erreichbarer Frame zugeordnet. Eine Aneinanderreihung aller, der Trajektorie zugeordneten Frames bildet dann die bestmögliche, mit der Konfiguration erreichbare Gesamtrajektorie. Die Übereinstimmung der vorgegebenen mit dieser erreichbaren Trajektorie wird dann wiederum im Qualitätswert  $Q_{motion}$  zusammengefasst und geht unter Berücksichtigung der Gewichtung  $w_{motion}$  in den Gesamtqualitätswert  $Q_{total}$  ein. Die Gesamtqualitätswerte der einzelnen untersuchten Konfigurationen dienen nachfolgend der Auswahl einer zu realisierenden Lösung.

### **Visualisierung und Datenerzeugungsmodul, 3D-Datenerzeuger**

Im Anschluss an die Entwicklung der Kinematik erfolgt neben den üblichen, zahlenbasierten Arten der Datenausgabe auch eine geometrische Ausgabe des Ergebnisses. Dies geschieht zunächst durch eine Visualisierung am Entwicklungsrechner mittels Simulationen sowie Geometriemodellen. Darüber hinaus werden für den Prozess zur Herstellung von Prototypen zusätzlich dreidimensionale, mittels RP-Anlagen verwendbare, Daten der einzelnen Elemente der entwickelten Kinematiken erstellt. Weiterhin sollen für deren nachfolgende Montage zur fertigen Kinematik zusätzliche In-

formationen über die Montagereihenfolge sowie die -ausrichtung ausgegeben werden (Abbildung 4.17).

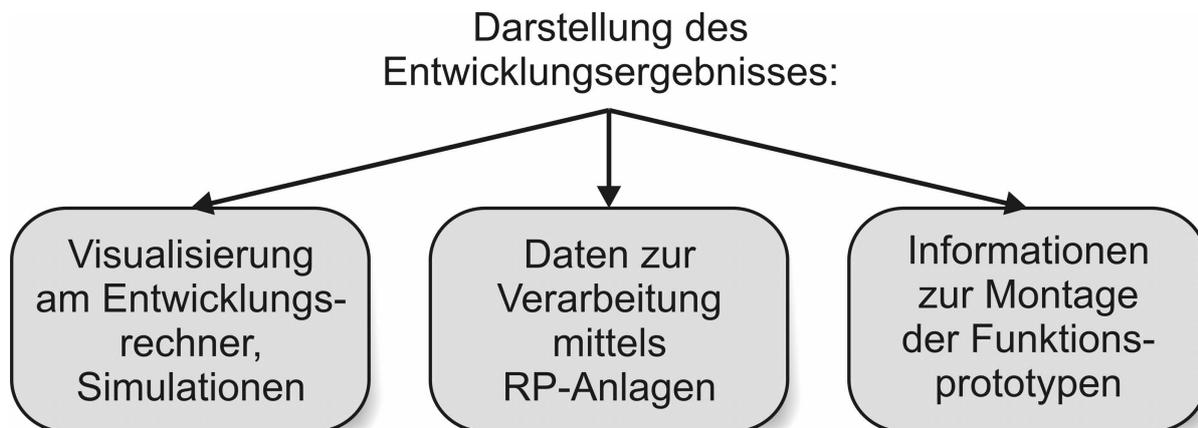


Abbildung 4.17: Drei Gruppen von Daten über das Ergebnis der Kinematikentwicklung werden an den Anwender ausgegeben: 2D/3D-Modelle und Simulationen am Entwicklungsrechner, mittels RP-Anlagen verarbeitbare Daten sowie Montageinformationen.

Zur Ausleitung der 3D-Modelle werden die STL-Repräsentationen des Baukastens verwendet. Diese müssen lediglich hinsichtlich der Parameter der Bauteile der dann aktuell entwickelten Kinematik angepasst werden. Die erhaltenen Daten können zunächst direkt in CAD-Anwendungen verwendet werden. Sollen sie zusätzlich für die Prototypenausgabe verwendet werden, wird bei on-demand-Fertigung der Bauteile zunächst eine Montagehilfe zur Vereinfachung des Zusammenbaus in die Bauteile integriert. Hierfür werden an den einzelnen Bauelementen Markierungen zur Verdeutlichung der Montagereihenfolge sowie der -ausrichtung angebracht. Werden standardisierte, vorgefertigte Elemente des Hardware-Mechanismenbaukastens verwendet, ist die Identifikation der Bauelemente auf Basis der Element-Referenzierung möglich. Der hierfür verwendete Code ist dann auf den Bauteilen angebracht. Die Auswahl der Bauelemente der Kinematik anhand der Referenzierungen soll dem Anwender auf Explosions- oder Zusammenbauzeichnungen bereitgestellt werden.

### **Software zur Erzeugung des Ansteuerungscodes**

Zur Realisierung der Ansteuerung der Antriebe des Mechanismus sind zwei Softwarekomponenten notwendig. Zunächst wird eine Möglichkeit zur Ausleitung der individuell für den Anwendungsfall notwendigen Ansteuerungsinformation aus der Synthese realisiert. Diese besteht aus den über der Zeit auftretenden Gelenkwinkeln der einzelnen Antriebe der Kinematik, welche in Form von Listen ausgeleitet werden. Sie müssen in einer vom Mikrocontroller der Steuerbox verarbeitbaren Form zur Verfügung stehen, um an diesen übertragen werden zu können. Darüber hinaus ist für den Mikrocontroller eine hinsichtlich Art und Eigenschaften der Antriebe angepasste Software zu deren Ansteuerung notwendig. Diese verarbeitet die Winkelinformationen zu Ansteuerungssignalen und gibt diese an die Antriebe aus.

Nach der Übertragung der Steuerungsinformationen kann mittels des Mikrocontrollers ein möglicher Ansteuerungsvorschlag realisiert werden. Die parallel zur Synthese unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Zielsystems durchgeführte aufgabenspezifische, automatisierte Bahnplanung bildet gemeinsam mit dieser intuitiven Steuerungsprogrammierung die Möglichkeit einer einfachen und intuitiven Bedienung. Durch die hierdurch mögliche Aktuierung des Prototyps kann unmittelbar eine Überprüfung der Funktionalitäten des entwickelten Systems erfolgen. Darüber hinaus stellt dies gerade für einen möglichen Einsatz der entwickelten Roboter in der Kleinserienproduktion einen viel versprechenden Ansatz zur notwendigen Senkung der Engineering- und Hardwarekosten dar (Reinhart & Krug, 2009).

### **4.3 Informationsflüsse während der Kinematikentwicklung**

Ein wichtiger Bestandteil der anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung mit Prototypenausgabe ist die zielgerichtete Übergabe von Informationen zwischen den einzelnen Teilelementen des Entwicklungssystems. Speziell zählt hierzu auch die Informationsbereitstellung für den Entwickler bzw. den Anwender. Eine Hauptquelle für Informationen ist, neben dem Entwickler, der in der Entwicklungssoftware hinterlegte Mechanismenbaukasten.

Den Beginn der Informationskette einer Entwicklung bilden die Eingaben des Benutzers. Von diesem wird das System zur Trajektorieneingabe bedient und damit die zu realisierende Trajektorie für die Verwendung im Entwicklungsrechner (z. B. als CSV-Datei) vorgegeben. Darüber hinaus werden vom Entwickler die Konzeptskizzen oder auch aus dem Vorwissen über das Zielsystem CAD-Daten erstellt. Erstere werden mittels des Scanners digitalisiert und als Bilddatei an den Entwicklungsrechner übergeben. Für die CAD-Daten ist diese Digitalisierung nicht notwendig. Die Daten werden direkt als STL-Dateien aus dem CAD-System ausgeleitet. Zusätzlich werden vom Bediener direkt Randbedingungen (maximale Gliedanzahl/Längen etc.) oder auch Informationen zur Bewertung der zu entwickelnden Mechanismen (Bewertungsfaktoren, Gewichtungen) an den Entwicklungsrechner übergeben.

Nun folgt die Durchführung der Kinematiksynthese auf dem Entwicklungsrechner. Dieser verwendet hierzu die Inhalte der sieben Repräsentationen der Bauelemente des Mechanismenbaukastens. Anhand dieser werden die verfügbaren Kinematikkomponenten sowie deren Übertragungsfunktionen etc. festgelegt. Nach der Durchführung der Synthese erfolgen unterschiedliche Ausgaben des Entwicklungsrechners. Zunächst wird die entwickelte Kinematik für den Bediener am Bildschirm visualisiert (Matlab<sup>®</sup>-Grafiken). Darüber hinaus erfolgt bei einer individuellen on-demand-Bauteilerstellung eine Ausgabe der notwendigen Bauteilmodelle (STL-Daten), welche mittels der RP-Anlage verarbeitet werden können. Mit dieser fertigt der Entwickler unter Verwendung seiner Kenntnisse über den Fertigungsprozess die RP-Rohmodelle, welche von ihm daraufhin am Montage- und Nachbearbeitungsarbeitsplatz nachbearbeitet werden. Bei Verwendung vorgefertigter Bauteile können diese direkt dem materiellen Mechanismenbaukasten entnommen werden. Die Ferti-

gung in der RP-Anlage sowie die Nachbearbeitung können dann entfallen. Die Bauelemente werden nun gemeinsam mit den Antrieben zu einem fertigen Prototyp montiert. Hierfür werden Montagepläne und -vorschriften, angezeigt durch grafische Darstellungen und Kennzeichnungen an den Bauteilen, verwendet. Sie werden vom Entwicklungsrechner erstellt und ausgegeben. Die fertigen Prototypen vom Montagearbeitsplatz sowie die notwendigen, in Form von Winkelabfolgen vom Entwicklungsrechner ausgegebenen, Informationen über deren Bewegung werden daraufhin mit der Mikrocontroller-Steuerbox verbunden bzw. an diese weitergegeben. Der von hieran automatisiert bewegbare Prototyp kann nachfolgend in das Zielsystem integriert werden. Durch den Betrieb im Zielsystem können vom Bediener Rückschlüsse auf die Verwendbarkeit des Gesamtsystems gezogen werden (Abbildung 4.18).

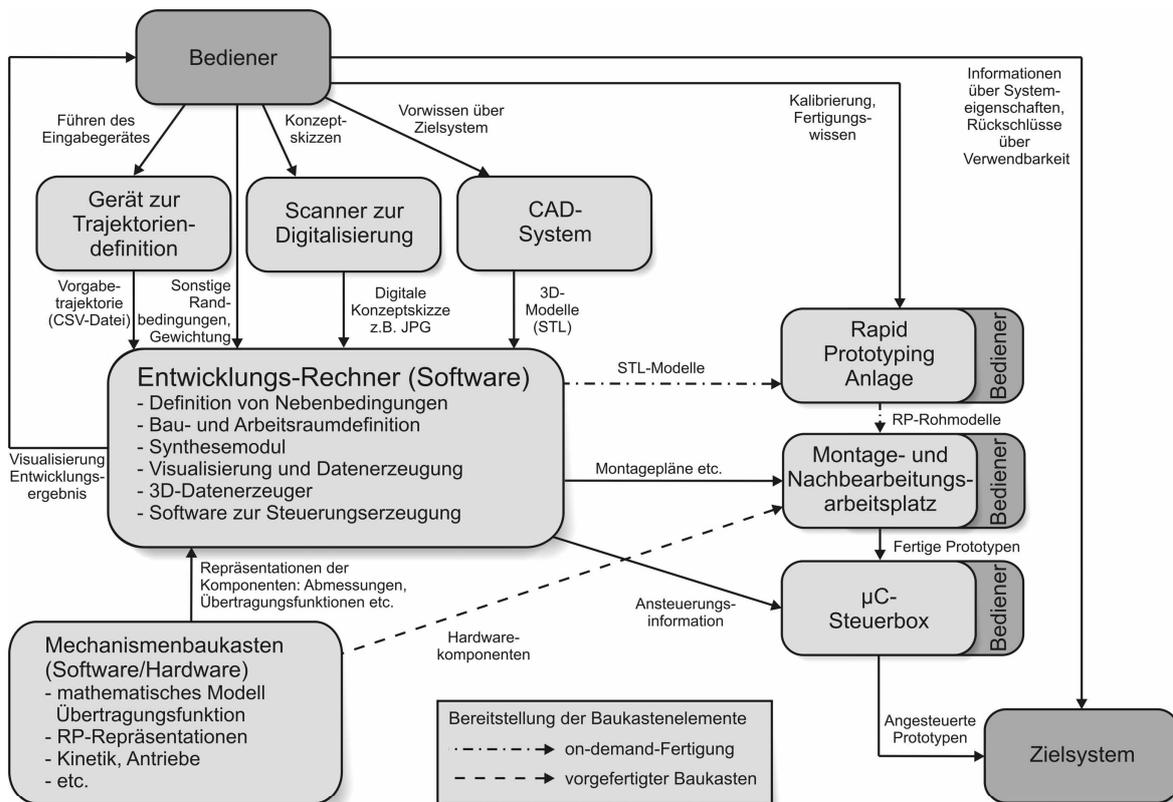


Abbildung 4.18: Dynamische Beschreibung des Ablaufs der anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung: allgemeine Informationsflüsse sowie von der Art der Bereitstellung, on-demand-Fertigung bzw. Verwendung vorgefertigter Baukastenelemente, abhängiger Informationsfluss.

Bei der Implementierung der Informationsflüsse der einzelnen Methodenbausteine der durch Prototypen unterstützten Kinematikentwicklung wurde insbesondere darauf geachtet, dass die für den Benutzer notwendigen Interaktionen möglichst einfach und intuitiv gestaltet sind. Darüber hinaus müssen, zur Maximierung des Nutzens des Systems, die jeweiligen Ausgaben anschaulich gestaltet werden. Die Ausgabe von Prototypen ermöglicht im Gegensatz zu der im Stand der Technik realisierten virtuellen Rückmeldung auch eine direkt mit der Entwicklung verknüpfte materielle, dreidimensionale Ausgabe der Kinematik und damit eine zusätzliche haptische Rückmeldung.

## 5. Ausgestaltung des Kinematikbaukastens

In Kapitel 4 wurden das Gesamtkonzept des Systems zur Unterstützung der Entwicklung serieller Kinematiken und die hierfür notwendigen Teilfunktionen vorgestellt. Diese können den Bereichen des Mechanismenbaukastens sowie den weiteren den Soft- sowie Hardware-Komponenten zugeordnet werden. Nachfolgend wird nun auf die Ausgestaltung des Baukastens sowie der enthaltenen Elemente unter Vertiefung des Beispiels eines Schubgelenks näher eingegangen.

Zunächst wird dabei die Festlegung der Elemente des Mechanismenbaukastens durch Betrachtung existierender Roboter sowie Baukastensysteme aufgezeigt. Daraufhin werden zwei mögliche Ausprägungen und damit auch Konzepte für die Verwendung des Baukastens definiert. Für die ausgewählten Elemente werden in einem weiteren Schritt die zu berücksichtigenden Parameter wie die Abmessungen, die Trägheitsmomente oder auch das maximal auftretende Spiel sowie deren Werte festgelegt.

### 5.1 Verwendete Baukastenelemente

Das Baukastensystem soll insbesondere der Entwicklung serieller Kinematiken dienen. Unter Berücksichtigung dieser Vorgabe kann, zur Reduktion der Komplexität des Baukastens sowie der Berechnungen während der Synthese, die Anzahl der notwendigen Bauelemente eingeschränkt werden. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die erreichbare Lösungsvielfalt hierdurch möglichst nicht verringert werden darf.

Eine Voraussetzung hierfür ist, dass alle regulär bei der Konstruktion serieller Kinematiken notwendigen Bauelemente im Baukasten enthalten sind. Um dies garantieren zu können, wurden zunächst vorhandene Baukästen zur Roboterentwicklung sowie marktverfügbare serielle Robotersysteme hinsichtlich der darin verwendeten Elemente untersucht. Hierbei wurde speziell bei den im Stand der Technik bereits vorgestellten, für Forschungs- und Industriearbeiten konzipierten, Baukästen die Verwendung prismatischer sowie rotatorischer Gelenke ersichtlich. Im Bereich industriell eingesetzter Roboter hingegen werden bevorzugt rotatorische Gelenke verwendet. Prismatische Führungen treten hier nur vereinzelt auf.

Diese beiden Elementarten, die aktuierten Dreh- sowie Schubgelenke wurden daher auch für eine Realisierung als Elemente des Mechanismenbaukastens festgelegt. Da bei seriellen Kinematiken keine passiv bewegten Gelenke verwendet werden, existieren für beide Gelenkartentypen ausschließlich angetriebene Varianten.

Neben den Gelenkbauteilen werden zusätzlich nicht angetriebene starre Elemente, mit welchen zum Beispiel Offsets realisiert werden können, in den Baukasten integriert. Um die Lösungsvielfalt des Baukastens zu maximieren, müssen die Bauteile möglichst flexibel miteinander kombiniert werden können. So wird neben der Verbin-

dung jeweils zweier Dreh- oder Schubgelenke die Kombination der Gelenkartentypen untereinander (Dreh/Schub bzw. Schub/Dreh) gefordert.

Für die Orientierung der Bewegungsachsen zweier aufeinander folgender Gelenke zueinander existieren theoretisch unendlich viele Varianten. Real werden jedoch nur wenige, zumeist mit rechtwinkliger oder paralleler Ausrichtung verwendet. Um die Komplexität der Elemente des Mechanismenbaukastens sowie die durch die Variation der Kinematik während der Synthese verursachte Rechenzeit gering zu halten, werden im Mechanismenbaukasten ebenfalls nur parallel oder rechtwinklig angeordnete Gelenkachsen realisiert. Hierdurch ergeben sich Standard-Kombinationen für die Abfolge zweier Gelenke in der kinematischen Kette, welche in Abbildung 5.1 dargestellt sind.

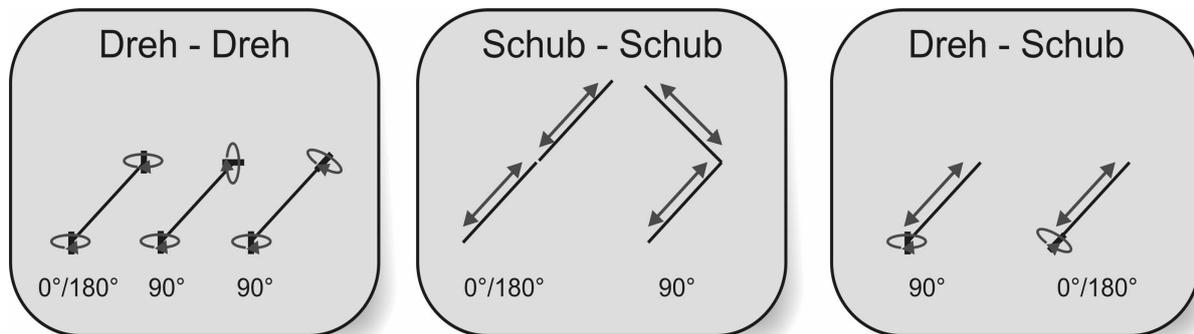


Abbildung 5.1: Zugelassene Kombinationen zweier Gelenke (Dreh/Dreh, Schub/Schub, Dreh/Schub) unter Berücksichtigung möglicher Ausrichtungen der Gelenkachsen zueinander. Als Erweiterung dieser Kombinationen können starre Elemente zwischen die Gelenke eingebracht sowie die Montagereihenfolge innerhalb der kinematischen Kette geändert werden.

Durch eine Kombination der verwendeten zwei Grundgelenkartentypen könnten bei Bedarf weitere kinematische Strukturen wie beispielsweise Kreuztische zusammengesetzt werden. Nachteilig kann sich dann jedoch der aufgrund der seriellen, nicht integralen Kopplung notwendige vergrößerte Bauraum auswirken. Weitere Gelenkartentypen wie beispielsweise Kugelgelenke wurden aufgrund der Beschränkung auf die Entwicklung serieller Kinematiken nicht näher betrachtet.

## 5.2 Ausprägungen des Mechanismenbaukastens

Für die Realisierung von Kinematiken mittels materieller Baukästen existieren, wie im Stand der Technik bereits vorgestellt die zwei Ansätze. Die Vor- und Nachteile dieser standardisierten oder auch maximalflexiblen Baukästen seien an dieser Stelle aufgrund des direkten Zusammenhangs mit der Ausgestaltung des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten hybriden Baukastens noch einmal erwähnt.

So bieten die standardisierten Baukästen aufgrund ihrer geringen Teileanzahl eine eingeschränkte Flexibilität, welche sich insbesondere auch im Fehlen von Kinematik-elementen wie Linearführungen oder unterschiedlichen Bauteilreihen zeigt. Die Komplexität der Montage der Kinematiken wird dadurch jedoch deutlich verringert. Wei-

terhin sind der Funktionsumfang sowie die Professionalität und der Produktcharakter der fertigen Prototypen durch integrierte Steuerungen etc. sehr hoch. Die Anwendung maximalflexibler Baukästen gestaltet sich sehr flexibel, wodurch jedoch deren Handhabung deutlich erschwert wird. In diesen Zusammenhang fällt auch die Vielzahl der Möglichkeiten zur Anbindung der meist einfachen Komponenten mit geringem Funktionsumfang untereinander. Die erstellten Kinematiken sind hinsichtlich ihrer Optik sehr prototypisch und daher nur für eine erste Darstellung eines Mechanismus/Roboters verwendbar.

In der vorliegenden Arbeit wird durch Verwendung einer software- sowie hardwareseitigen Hinterlegung der Bauelemente sowie die Nutzung des RP-Verfahrens 3D-Druck ein hybrider Kinematikbaukasten ermöglicht. Mit dessen Hilfe können die positiven Eigenschaften beider Baukastentypen verbunden und genutzt werden. So können die bezüglich ihres prinzipiellen Aufbaus anhand ihrer Abbildung in der Synthese-Softwareumgebung standardisierten Elemente des Mechanismenbaukastens während der virtuellen Kinematikentwicklung im Hinblick auf ihre Dimensionen maximal flexibel angepasst werden. Während der Synthese können so die Konfiguration der Kinematik sowie die Bauelemente selbst bis zuletzt anhand ihrer Parameter (Längen, Größen etc.) variiert werden. Erst durch die endgültige Festlegung der Konfiguration wird die Flexibilität eingeschränkt (Abbildung 5.2).

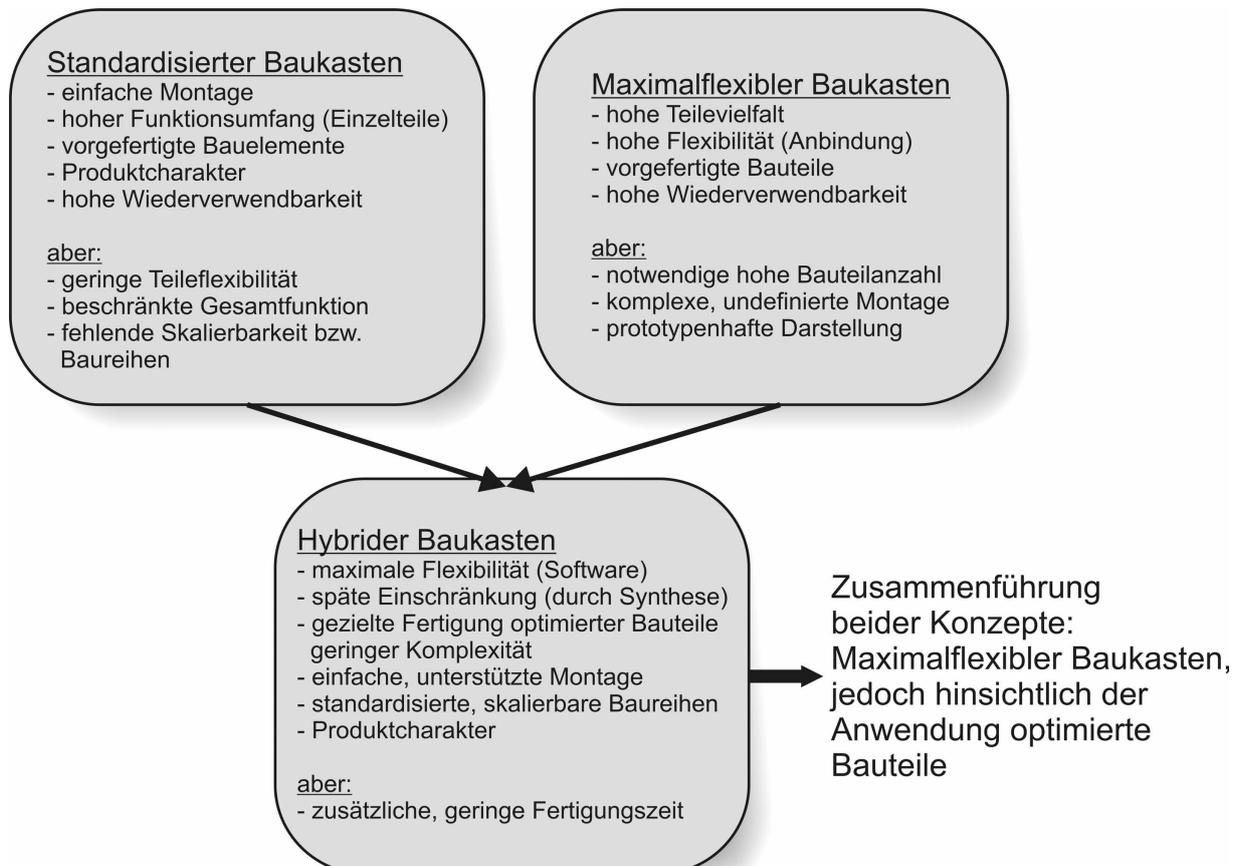


Abbildung 5.2: Eigenschaften der standardisierten sowie der maximalflexiblen Kinematikbaukästen und deren Verknüpfung im hybriden Baukasten.

Aus diesem Grund können mit Hilfe des vorgestellten hybriden Baukastensystems zwei Ansätze verfolgt werden. Zum einen können die während der Synthese verwendeten Bauelemente bereits standardisiert vorgefertigt werden. Nach der Ermittlung des daraufhin durch den vorgefertigten Baukasten eingeschränkten Synthesergebnisses, können die Bauelemente dann direkt dem Baukasten entnommen und zu dem gewünschten Mechanismus/Roboter montiert werden. Die Abdeckung des möglichen Lösungsraumes hängt hier von der Anzahl der verfügbaren Elementausführungen und der möglichen Kombinationen ab. Aufgrund Letzterer muss das Design der Bauelemente so gewählt werden, dass dahingehend nur möglichst geringe Einschränkungen entstehen. Hauptvorteil dieses Ansatzes ist, dass beim Prototypenaufbau unmittelbar auf die vormontierten Bauteile zurückgegriffen werden kann. Zur Herstellung der Prototypen sind dann lediglich reine Montagetätigkeiten durchzuführen.

Um die vorgezogene Fertigung aller Bauelemente zu vermeiden und die Flexibilität der Entwicklung zu maximieren, wird bei Anwendung des zweiten Ansatzes auf eine on-demand-Erzeugung der Bauteile zurückgegriffen. Diese wird durch die zeitnahe Erzeugung der Bauteile mittels der RP-Fertigung ermöglicht. Dafür wird jedoch, im Vergleich zu anderen Baukastenprinzipien oder auch der vorgezogenen Baukastenfertigung, eine geringe zusätzliche Fertigungszeit benötigt. Die Bauteile können dann aber mit individualisierten Eigenschaften wie beispielsweise einer exakt abgestimmten Länge oder weiteren, hinsichtlich ihrer Einbausituation notwendigen Anpassungen hergestellt werden. Durch diese anwendungsspezifische Fertigung wird zugleich der Eindruck eines spezialisierten Produkts erzeugt. Weiterhin können den Bauteilen zusätzliche Informationen aufgeprägt werden, welche wiederum die Montage vereinfachen und damit die Montagezeit verringern können (vgl. Kapitel 6.2.2). Während der Synthese bietet die Verwendung des hybriden Baukastens wie oben bereits erwähnt den Vorteil eines vergrößerten Lösungsraumes. So besitzen die zunächst rein virtuell im Mechanismenbaukasten realisierten Elemente, deren Längen und Abmessungen erst während der Synthese bestimmt werden, bis zu dieser Festlegung uneingeschränkte Flexibilität. Hierdurch kann eine exaktere Abstimmung des Mechanismus/Roboters auf das Zielsystem erfolgen. Durch die größere Variabilität der Bauteile, welche hauptsächlich von der Auflösung der durchgeführten Längenvariationen während der Synthese bestimmt wird, ist jedoch auch eine längere Rechenzeit in Kauf zu nehmen.

Die im Folgenden vorgestellte Definition der Eigenschaften der Bauelemente kann auf beide Konzepte, die on-demand-Fertigung sowie den vorgefertigten Baukasten, angewendet werden. Nachfolgend wird sie am Beispiel des vorgefertigten Baukastens aufgezeigt. Anders als bei der on-demand-Fertigung ergibt sich bei dessen Definition die Herausforderung, trotz der Festlegung der standardisierten Bauelemente maximale Flexibilität gewährleisten zu können.

Neben der angepassten Fertigung einzelner Bauelemente, ergeben sich durch die Verwendung von RP-Verfahren weiter gehende Möglichkeiten zur Erzeugung von

Kinematiken. So können während eines Syntheseprozesses aus einzelnen Standardelementen entwickelte Kinematiken, analog zu den im Stand der Technik vorgestellten Beispielen der reinen, Synthese-unabhängigen Fertigung von Kinematiken (vgl. Ebert-Uphoff, et al., 2005), als Ganzes gefertigt werden. Hauptvorteil dieses Vorgehens ist die Einsparung des Montageprozesses. Hierdurch können Montagefehler, abgesehen von den bei der Integration der Antriebe möglichen, vermieden werden. Zur montierten Fertigung wurden beispielhaft Untersuchungen auf Basis der Synthese eines Viergelenks durchgeführt (Abbildung 5.3). Jedoch stellten sich bei dieser Methode die aufgrund der Fertigungstoleranzen und des so genannten Bleeding-Effekts vergrößert auszuführenden Spaltmaße als nachteilig heraus. Durch diese wird das auftretende Spiel signifikant erhöht und somit auch die Genauigkeit der realisierbaren Bewegung begrenzt. Aus diesem Grund wurde im weiteren Vorgehen von der Ausgabe montiert gefertigter Mechanismen/Roboter abgesehen.

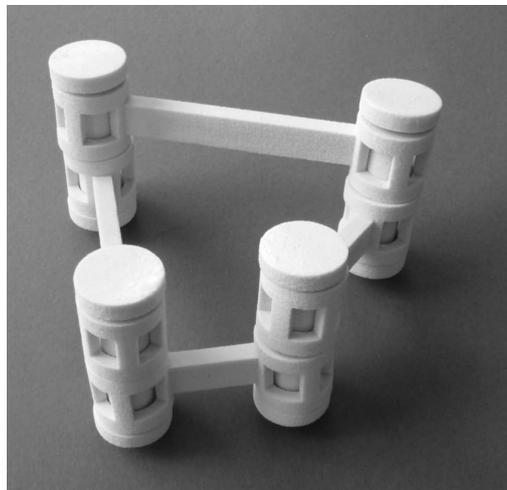


Abbildung 5.3: Anfertigung montiert gefertigter Mechanismen/Roboter aus Standard-Bauelementen mittels des RP-Verfahrens 3D-Druck auf Basis der Synthese eines Viergelenks (Angelehnt an: Fischer, et al. (2008).

### 5.3 Eigenschaften der verwendeten Elemente

Die drei in Kapitel 5.1 festgelegten Bauelementtypen können in großen Teilen anhand einheitlicher, jedoch unterschiedlich ausgeprägter Parameter und Eigenschaften charakterisiert werden. So unterscheiden sie sich in ihrem Aufbau sowie ihrer Geometrie, durch deren Hauptabmessungen auch unterschiedliche Derivate derselben Bauteilart definiert werden können. Das Hauptcharakteristikum der verschiedenen Bauelemente stellt jedoch deren mathematische Übertragungsfunktion bezüglich der realisierbaren Bewegung, deren Kinematik, dar. Neben den darüber hinaus vorhandenen statischen Eigenschaften der Bauelemente leisten die integrierten Antriebe und die damit verbundene Kinetik der Elemente einen großen Beitrag zu deren Eigenschaften.

### 5.3.1 Aufbau und Hauptabmessungen der Elemente

Ein Hauptaugenmerk bei der Entwicklung des in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Baukastens war unter anderem die beabsichtigte Vereinfachung der Roboterentwicklung durch die Verwendung standardisierter Bauelemente. Hierdurch können Entwicklungszeiten, darüber hinaus speziell bei Einsatz eines vorgefertigten Baukastens auch weitere Ressourcen wie Arbeitszeit oder Materialkosten eingespart werden. Daneben enthalten die Baukastenelemente nur standardisierte, kostengünstig herzustellende oder zu beschaffende Bauelemente wie z. B. Motoren aus dem Bereich des Modellbaus. Die Einsparung von Ressourcen wird weiterhin durch die Verwendung von RP-Elementen unterstützt. Gerade bei kleinen Stückzahlen, im vorliegenden Fall in Abhängigkeit von der entwickelten Kinematik gegebenenfalls Stückzahl eins (on-demand-Fertigung), ist deren Anfertigung vergleichsweise kostengünstig, da bei dieser Individualisierung der gefertigten Bauelemente konventionelle Produktionsstrukturen zunehmend an Wirtschaftlichkeit verlieren (Zäh, et al., 2008). Aufgrund der Eigenschaften der verwendeten RP-Materialien (Kapitel 6.2) müssen jedoch konstruktive Maßnahmen zur Verringerung von Stick-Slip sowie zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit berücksichtigt werden.

Alle Elemente der jeweiligen Bauteilgruppe, der starren Elemente, der Drehgelenke sowie der Schubgelenke sind jeweils nach demselben Muster aufgebaut. Sie unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Werte einer begrenzten Anzahl von Variablen und Parametern. Die Referenzierung der Bauelemente erfolgt jeweils, wie oben bereits vorgestellt, über das *base*-Koordinatensystem, welches sich an der Schnittstelle zu dem in der kinematischen Kette vorangehend montierten Element befindet. Sowohl das Drehgelenk als auch das Schubgelenk besteht, abgesehen von der Antriebskinematik auf welche später näher eingegangen wird, aus zwei relativ zueinander bewegbaren Teilelementen, dem Grundelement sowie dem Antrieb. Die oben eingeführten Koordinatensysteme *A* sowie *B* werden für die Ausrichtung bzw. Position des Antriebs des Elements in der Grundstellung sowie in einer durch den Antrieb variierten Stellung verwendet (Abbildung 5.4). Bei starren Elementen sind die Systeme *A* und *B* deckungsgleich.

In Bezug auf die Aktuierung der Baukastenelemente wurde im Sinne der Reduktion der Komplexität sowie des Montageaufwands darauf geachtet, einen einfachen Aufbau zu realisieren und die Anzahl benötigter Teilelemente gering zu halten. Daher wurde bewusst auf den Einsatz von Lagern oder auch Spindeln verzichtet. So wurden bei der Aktuierung der Drehgelenke die Antriebe direkt und, mit Ausnahme der im Motor selbst integrierten, ohne die Verwendung von Getrieben angebunden.

Für die Bewegung der Linearführungen wurde ein Servomotor in Verbindung mit einem einfachen Gelenkgetriebe verwendet. So konnte eine hinsichtlich Komplexität und Kosten optimierte Lösung erzielt werden. Bei der Integration des Gelenkgetriebes zur Realisierung der Linearbewegung wurde zur Maximierung der Montageflexibilität sowie des Arbeitsraumes darauf geachtet, die Wahrscheinlichkeit des Auftre-

tens von Kollisionen mit weiteren Bauelementen gering zu halten. Da sich jedoch eine vollständige Integration in die Elemente aufgrund derer geringen Größe zu Lasten der einfachen Montage auswirken würde, wurde für die Antriebskinematik auf einer Seite der Linearführungen Raum zur Verfügung gestellt. Um bei verschiedenen kinematischen Konfigurationen die Auftretenswahrscheinlichkeit von Kollisionen trotzdem gering zu halten, kann die Anordnung des Gelenkgetriebes bei der Montage variiert werden. So kann das Gelenkgetriebe einer Linearführung durch Änderung der Montagerichtung des Motors oder Drehen des kompletten Bauelements auf allen vier Längsseiten angeordnet werden.

Zur Realisierung aller in Abbildung 5.1 aufgeführten Kombinationen von Drehgelenken mit weiteren Elementen (starres Element, Dreh-, Schubgelenk) werden zwei unterschiedliche Typen von Drehgelenken benötigt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Anordnung der Schnittstelle zum vorangehenden Element. Darüber hinaus sind sie jedoch baugleich. Nachfolgend werden die Begriffe axiales sowie gewinkeltes Drehgelenk verwendet. Ersteres besitzt eine zum vorangehenden Element parallele, das zweite eine um  $90^\circ$  geneigte Drehachse.

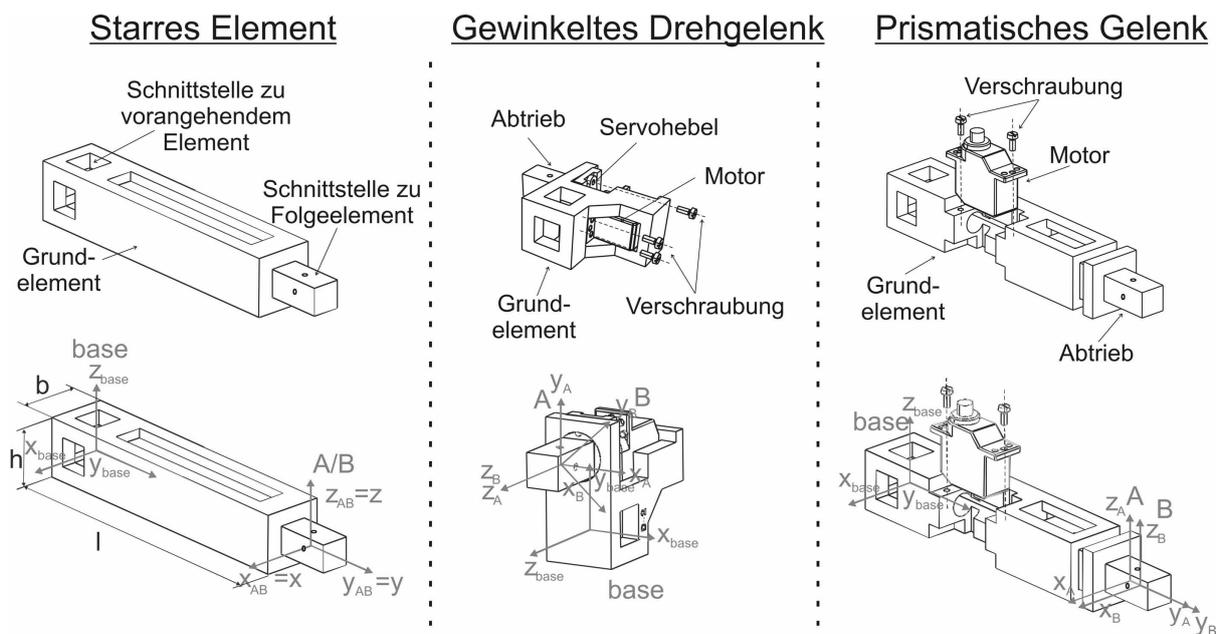


Abbildung 5.4: Bestandteile der Bauelemente sowie Anbindung derer Antriebe: starres Element, gewinkeltes Drehgelenk ( $90^\circ$ ) sowie prismatisches Gelenk. Auf die Darstellung des axialen Drehgelenks mit zum vorangehenden Element paralleler Achse wurde hier aufgrund des analog zum dargestellten Drehgelenktypus gearteten Aufbaus verzichtet.

Für beide Gelenktypen, das Dreh- sowie das Schubgelenk, werden innerhalb einer Baugröße dieselben Antriebe verwendet. Hierdurch sind jeweils auch dieselbe Strategie zur Anbindung der Antriebe, eine Senkung der Anzahl unterschiedlicher Bauteile und damit eine Verringerung der Komplexität des Baukastensystems möglich.

Beim Ansatz der Verwendung eines bereits vorgefertigten Mechanismenbaukastens können die Bauteile nicht mit kontinuierlich, jedoch aber in diskreten Schritten variiert

ten Bauteilparametern wie Längen etc. zur Verfügung gestellt werden. Dies führt zu einer Reduzierung der Lösungsvielfalt. Trotz dieser Einschränkung kann jedoch durch eine kombinierte Mechanikdefinition und Steuerungsentwicklung sowie eine geeignete Wahl verfügbarer, standardisierter Bauteillängen, eine hohe Genauigkeit bezüglich der Erreichung der Zielbewegung realisiert werden.

Um durch die Festlegung der Bauteillängen die kombinatorischen Möglichkeiten zu maximieren, erfolgte die Definition eines Multiplikators  $m_L$  zur Berechnung der einzelnen Elementlängen. Dieser kann, angelehnt an die in DIN (1974) beschriebene Ermittlung von Normzahlen sowie Normzahlreihen, mit Hilfe von Formel (5.1) berechnet werden. Dieselbe, auf dem Prinzip der Renard-Serien basierende, Einteilung wird beispielsweise zur Definition der Größen elektrischer Widerstände verwendet (DIN, 1985). Für den vorliegenden Baukasten werden hiermit unterschiedliche Längenreihen  $n$  mit einzelnen Bauelementen  $x$  definiert. Die Anzahl notwendiger Elemente des Baukastens zur Realisierung der größtmöglichen Flexibilität hinsichtlich der Bauteillängen und damit auch die Komplexität des Baukastens können durch Verwendung dieser Längenreihen verringert werden.

$$m_L(n, x) = \sqrt[n]{10^x} \text{ mit } x = 0, \dots, (n-1). \quad (5.1)$$

Tabelle 5.1 zeigt die erhaltenen Werte der Multiplikatoren im Rahmen der mathematischen Längenreihen 1-10, jeweils reduziert auf die ersten sieben Längen.

Tabelle 5.1: In Anlehnung an die Normzahlreihen (DIN, 1974) festgelegte Multiplikatoren  $m_L$  für die Baukastenelemente unterschiedlicher Längenreihen (1-10). Zur Ermittlung der Bauteillänge werden diese mit der jeweilig verwendeten Grundlänge multipliziert.

Reihe	Baukastenelement Nr.						
	0	2	3	4	5	6	7
1	1.00	10.00					
2	1.00	3.16	10.00	31.62	100.00	316.23	1000.00
3	1.00	2.15	4.64	10.00	21.54	46.42	100.00
4	1.00	1.78	3.16	5.62	10.00	17.78	31.62
5	1.00	1.58	2.51	3.98	6.31	10.00	15.85
6	1.00	1.47	2.15	3.16	4.64	6.81	10.00
7	1.00	1.39	1.93	2.68	3.73	5.18	7.20
8	1.00	1.33	1.78	2.37	3.16	4.22	5.62
9	1.00	1.29	1.67	2.15	2.78	3.59	4.64
10	1.00	1.26	1.58	2.00	2.51	3.16	3.98

Vor der Verwendung der mittels der Normzahlreihen ermittelten Multiplikatoren zur Bestimmung der Bauteillängen muss im Folgenden beachtet werden, dass in Abhängigkeit von der Ausführung der Bauelemente nicht alle sich ergebenden Längen für mögliche Elemente verwendet werden können. So werden sie bei Betrachtung der aktuell verwendeten Bauelemente durch einen minimalen sowie einen maximalen Wert beschränkt. Ersterer resultiert aus dem Umfang der Gelenke sowie deren

Raumbedarf. Hierbei ist speziell auch der zur Integration der Antriebe sowie der Antriebskinematik erforderliche Raumbedarf zu beachten. Die maximalen Längen der Bauelemente sind wiederum durch die Stabilität der Bauteile beschränkt. Speziell bei Verwendung von RP-Elementen werden die Gliedlängen nach oben hin durch die Erhöhung des Eigengewichts sowie die hierdurch auftretende Biegebelastung auf die in der kinematischen Kette voran gehenden Elemente beschränkt. Im Folgenden wurden die Längen der Grundelemente (Verbindungsglieder) sowie der Gelenkmodule (Schubgelenke, Drehgelenke) unter Verwendung der Multiplikatoren der sechsten Reihe aus Tabelle 5.1 ermittelt. So werden nach Rundung der Multiplikatoren  $m_L$  Elementlängen von 2-, 3-, 5- sowie 7-mal der Grundlänge  $g_E$  verwendet. Letztere stellt die Seitenlänge der quadratischen Querschnitte der Bauelemente dar. Die genauen Werte der Elementlängen  $l(x, n, g_E)$  können mittels Formel (5.2) ermittelt werden. Zu deren Berechnung für die nachfolgend im vorgefertigten Mechanismenbaukasten realisierten Elemente wurde von einer Grundlänge der Elemente von 21 mm ausgegangen.

$$l(x, n, g_E) \approx m_L(n, x) \cdot g_E = \sqrt[6]{10^x} \cdot 21\text{mm}. \quad (5.2)$$

In Abhängigkeit von ihrer Bauposition innerhalb der Kinematik werden die Bauelemente unterschiedlich stark belastet. So werden Elemente am Beginn der kinematischen Kette (*base*) stärker belastet als an deren Ende (*tcp*). Daher erscheint es sinnvoll, Elemente am Beginn der kinematischen Kette vergrößert auszuführen. Mit zunehmendem Abstand von der Position der Anbindung sollten sie jedoch, aufgrund der durch sie verursachten Gewichtsbelastung auf vorangehende Elemente, verkleinert ausgebildet werden. Dieser Tatsache wird durch Verwendung unterschiedlich großer Bauelemente, welche in die drei Baugrößen *small* (*s*), *medium* (*m*) und *large* (*l*) eingeteilt werden, Rechnung getragen. Elemente verschiedener Reihen werden untereinander mittels Verbindungselementen gekoppelt (Abbildung 5.5).

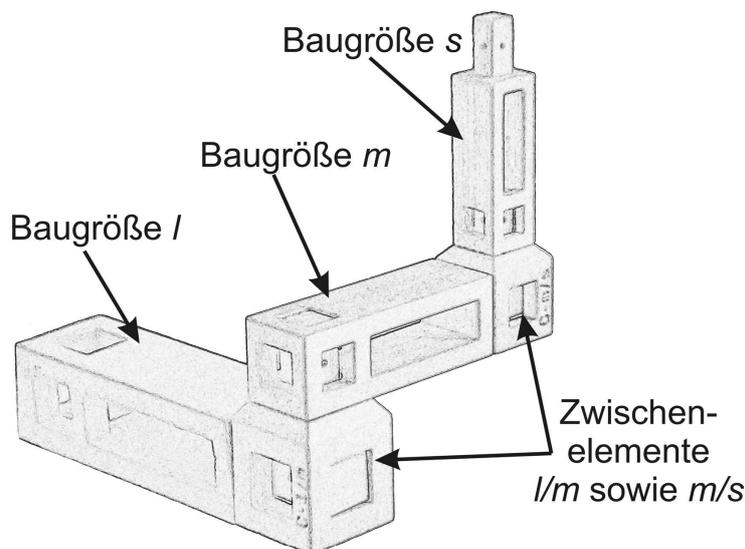


Abbildung 5.5: Darstellung starrer Baukastenelemente der Baugrößen *s*, *m* und *l* sowie der zugehörigen Verbindungselemente *l/m* und *m/s*.

Die oben beschriebenen Bauelemente mit einer Grundlänge von 21 mm bilden die mittlere Baugröße. Die Grundlängen der großen sowie der kleinen Baugröße sind jeweils um ein Drittel größer bzw. kleiner ausgeführt (28 mm bzw. 14 mm). Die nachfolgend aufgeführte Ausgestaltung sowie die Beschreibung der Elementeeigenschaften beziehen sich auf die mittlere Baugröße. Sie können jedoch analog auch auf die kleine sowie die große Baugröße angewendet werden.

### 5.3.2 Kinematische Eigenschaften der Baukastenelemente (Geometrie, Übertragung)

Die Abmessungen der Bauelemente sowie die integrierten Antriebe bestimmen die kinematischen Eigenschaften des entwickelten Systems. So bewirkt die Geometrie der Elemente zunächst durch deren reine Aneinanderreihung eine geometrische Verschiebung bzw. Verdrehung. Weiterhin wirken sich die Abmessungen bei Elementen mit translatorischem Freiheitsgrad indirekt auch auf den möglichen Bewegungsbereich und damit die mögliche Bewegung aus. Die verwendeten Antriebe, deren Positionierung sowie das verwendete Getriebe beeinflussen durch ihre Bewegungsbereiche die Kinematik hinsichtlich der möglichen Übertragungsfunktion (Translation bzw. Rotation). Die Position der Antriebe (KOS-System *akt*) ist jeweils durch eine Transformation definiert, mittels derer der Antrieb eines jeden aktuierten Elements von dessen *base*-System aus referenziert wird. Formel (5.3) zeigt beispielhaft diese Transformationen vom *base*-System eines Schubgelenks der Größe 5 in das KOS-System dessen Antriebs (*akt,trans*). So erfolgt dabei eine Verschiebung in alle Achsenrichtungen in den Mittelpunkt der Antriebsachse. Die erforderlichen Translationen sind jeweils in Millimetern angegeben.

$${}^{base}\mathbf{T}_{akt,trans} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -5 \\ 0 & 1 & 0 & 21.6 \\ 0 & 0 & 1 & 16.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.3)$$

Formel (5.4) zeigt weiterhin diese Transformation bei Betrachtung eines gewinkelten Drehgelenks in das KOS-System *akt,rot90*. Hierbei erfolgt lediglich eine Verschiebung vom *base*-System entlang der *y*- bzw. der *z*-Achse.

$${}^{base}\mathbf{T}_{akt,rot90} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 1 & -0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.4)$$

In Formel (5.5) wird dieser Sachverhalt für ein axiales Drehgelenk aufgezeigt (KOS-System *akt,rot,axial*). Dabei erfolgt neben einer Verschiebung in *z*-Richtung eine zusätzliche Rotation von  $-90^\circ$  um die *x*-Achse.

$${}^{base}T_{akt,rot,axial} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90^\circ) & -\sin(-90^\circ) & 0 \\ 0 & \sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 44.65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90^\circ) & -\sin(-90^\circ) & -\sin(-90) \cdot 44.65 \\ 0 & \sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) & 44.65 \cdot \cos(-90) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

Die Zuordnung des Antriebs zum Abtrieb bzw. zur Verbindung mit den nachfolgenden Elementen der Kinematik wird wiederum durch eine Transformation von dessen Koordinatensystem (*akt*) zur Ruheposition des Abtriebs (*A-KOS*) beschrieben. Von diesem mittig im Abtriebsbolzen befindlichen *KOS* aus wird später die durch das Element realisierte Bewegung beschrieben. Für die während der Synthese durchgeführten Berechnungen sind die durch die Geometrie definierten Transformationen  ${}^{base}T_A$  jedes Elements interessant. Diese setzen sich aus den Verschiebungen  $q_y$  und  $q_z$  sowie der Rotation  $R_x$  zusammen. Dabei verfügen starre Elemente, Drehgelenke mit rechtwinklig angeordneter Drehachse sowie Schubgelenke nur über translatorische Transformationen. Drehgelenke mit zum vorangehenden Element axial ausgerichteter Drehachse benötigen dagegen zu ihrer vollständigen Beschreibung eine zusätzliche Rotation um die *x*-Achse des *base*-Systems. Die Transformationswerte für die aktuell verwendeten kinematischen Elemente sind in Tabelle 5.2 dargestellt sind.

Tabelle 5.2: Aufgrund der Geometrie der Baukastenelemente sowie deren möglicher Bewegung notwendige Transformationen vom *base*-*KOS* zum *A-KOS* sowie vom *A-* zum *B-KOS*. Die aufgezeigten Größen gelten für Elemente der sechsten Reihe, mittlerer Baugröße.

Elementart	Elementgröße	Verschiebung/Verdrehung durch Geometrie				mögliche Bewegung	
		trans(x), [mm]	trans(y), [mm]	trans(z), [mm]	rot(x), [°]	trans(y), [mm]	rot(z), [°]
starres Element, stationary (S)	2	-	42	-	-	-	-
	3	-	63	-	-	-	-
	5	-	105	-	-	-	-
	7	-	147	-	-	-	-
Schubgelenk, prismatic (P)	5	-	105	-	-	36.5	-
	7	-	147	-	-	78.5	-
Drehgelenk, rotatory (R), gewinkelt	2	-	31.5	20.5	-	-	ca. 210° (theorisch)
Drehgelenk, rotatory (R), axial	3	-	66	-	-90	-	ca. 210° (theorisch)

Die Bewegung wirkt sich speziell bei rotatorischen Gelenken auf die oben bereits erwähnte Formel (7.2) in Form einer Variation des Winkels  $\alpha$  um die *z*-Achse aus. Für die Abbildung der Bewegungen translatorischer Elemente wird Formel (5.6) verwendet, welche eine einfache Verschiebung entlang der *y*-Achse des Elements (um  $q_y$ ) darstellt.

$${}^A\mathbf{T}_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.6)$$

Zur Definition der vollständigen kinematischen Übertragungsfunktion muss die Antriebskinematik mit berücksichtigt werden. Bei den beschriebenen Drehgelenken erfolgt die Bewegungsübertragung ohne zusätzliches Getriebe direkt durch den Antrieb. Daher ist hier die resultierende, durch das Baukastenelement durchgeführte Bewegung trivial und direkt aus der Motorbewegung als Rotation um die z-Achse abzuleiten. Dabei ist jedoch der Bewegungsbereich der aktuell eingesetzten Antriebe zu beachten. Dieser beschränkt den durch den mechanischen Aufbau der Drehgelenke eigentlich möglichen Bewegungsbereich von ca.  $210^\circ$  auf  $\pm 60^\circ$ . Bei Betrachtung der translatorischen Kinematikelemente erfolgt der Antrieb indirekt über ein ungleichmäßig übersetzendes Viergelenkgetriebe, durch welches eine Schubkurbel realisiert wird. Mittels dieses Getriebes wird die rotatorische Bewegung des Antriebs in die translatorische Bewegung des Abtriebs umgesetzt. Hierdurch variieren während einer Bewegung mit konstanter Antriebsdrehzahl aufgrund der sich ändernden Übersetzung sowohl die Geschwindigkeit der Linearbewegung (ungleichmäßiger Hub) als auch die resultierende Hubkraft. Der Verlauf der dabei auftretenden unterschiedlichen Übertragungswinkel beeinflusst zusätzlich die Qualität der Bewegung.

Zur Realisierung der Schubkurbel werden neben dem Motor und den beiden grundlegenden Bauelementen des Schubgelenks (Grundelement, Abtrieb) zwei weitere Lenker sowie Gelenke verwendet. Für diese in der Regel als Drehgelenke ausgeführten Gelenke werden zur Vereinfachung der Montage der Standard-Kunststoffkomponenten im aktuellen Fall ein Dreh- sowie ein Kugelgelenk eingesetzt. Ein während der Montage möglicherweise auftretender vertikaler Versatz der Gelenkpositionen kann durch die Elastizität sowie das Spiel der Gelenke ausgeglichen werden. Da er zudem als vergleichsweise gering angenommen werden kann, bleibt er in den weiteren Überlegungen unberücksichtigt.

### Exemplarische Auslegung der Antriebskinematik eines Schubgelenks

Nachfolgend wird beispielhaft die Auslegung der Antriebskinematik eines Schubgelenks (Länge 5, mittlere Baugröße) mit einer Länge im Grundzustand von 10,5 cm aufgezeigt. Dabei wurde das Ziel eines maximierten Fahrweges bei gleichzeitig möglichst konstanter Übersetzung verfolgt. Zusätzlich wurde ein hoher Übertragungswinkel als Kennzeichen der Qualität der Bewegungsübertragung gefordert. Während der Auslegung wurden die Längen  $l_1$  und  $l_2$  der beiden Lenker des Viergelenks (Servohebel und Koppel) variiert. Eine geometrische Vorgabe stellte dabei die zur Vermeidung späterer Kollisionen gewünschte räumliche Begrenzung des Hebelmechanismus auf lediglich eine Seite des prismatischen Bauelements dar. Daher darf bei Verwendung des aktuell betrachteten Führungselements die Länge des Ser-

vohebels maximal 15,5 mm betragen. Zusätzlich ergibt sich durch die Ausführung der Motorachse eine minimale Länge von 5 mm.

Die exemplarische Auslegung der Schubgelenkkinematik beinhaltet folgende Schritte:

- Definition möglicher Lenkerlängen  $l_1$  und  $l_2$
- Definition des Übertragungswinkels  $\mu$  am aktuellen Schubgelenk
- Bestimmung der direkten Kinematik, Durchführung der Berechnungen
- Abschätzung des Einflusses geometrischer Variationen

### 1. Definition der Lenkerlängen

Zur Definition der Länge  $l_2$  der Koppel ist die Position der Anbindung des verwendeten Kugelgelenks am Antrieb zu beachten. So darf diese weder in ausgefahrenem, noch in eingefahrenem Zustand mit dem Grundelement der Längsführung kollidieren. Hieraus ergibt sich beispielsweise bei einer maximalen Länge des Servohebels von 15 mm eine maximale Länge der Koppel von ca. 43 mm, welche in diesem Fall zugleich auch die Mindestlänge darstellt (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Vorgabe der Gliedlängen der Schubkurbel zum Antrieb einer translatorischen Führung der Länge 5, Baugröße  $m$ : Für  $l_1$  sind aufgrund geometrischer Begrenzungen Werte zwischen 5 und 15 mm möglich. Die Länge  $l_2$  der Koppel kann, unter der Voraussetzung der Kollisionsfreiheit mit dem Grundelement des Gelenks, minimale (min), mittlere (med) sowie maximale (max) Werte zwischen 33 und 53 mm annehmen.

Lenkerlängen [mm]		Verteilung	max. Verfahrensweg $\Delta y$ [mm]
Lenker $l_1$	Lenker $l_2$		
5	33	min	9,88
5	43	med	9,92
5	53	max	9,95
10	38	min	19,81
10	43	med	19,85
10	48	max	19,88
15	43	min/med/max	29,77

Nach der Festlegung der möglichen Kombinationen der Lenkerlängen  $l_1$  und  $l_2$  erfolgte die Auslegung und Optimierung des Gelenkgetriebes. Hierzu wurden den Winkelstellungen des Antriebs die resultierenden möglichen Hubpositionen, die Übertragungsfunktion erster Ordnung sowie die auftretenden Übertragungswinkel einander gegenüber gestellt. Letztere sind speziell aufgrund der zwischen den RP-Bauteilen auftretenden hohen Reibung relevant.

## 2. Definition des Übertragungswinkels $\mu$ am aktuellen Schubgelenk

Der Übertragungswinkel  $\mu$  einer kinematischen Kette ist definiert als der spitze Winkel zwischen der Tangente  $t_B$  an der Bahn des Abtriebspunktes  $B$  sowie der Tangente an der Richtung des Punktes  $B$  um  $A$ . Diese wird als  $t_{BA}$  bezeichnet. Alternativ kann er auch als Winkel zwischen der Richtung des im Unendlichen liegenden Drehpunkts der Schubbewegung  $B_0$  sowie der Koppel zwischen Kurbel und Schubgelenk bestimmt werden (Abbildung 5.6). Grundlage hierfür ist die Annahme, dass eine Linearbewegung angenähert einer Drehung um einen unendlich entfernten Drehpunkt entspricht. Nach dieser Definition bewegt sich die Größe des Übertragungswinkels damit stets zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ . Für ein Viergelenkgetriebe sollte der minimal einzuhaltende Übertragungswinkel  $\mu_{min}$  größer als ein empirisch ermittelter Erfahrungswert  $\mu_{erf}$  sein. Dieser Sachverhalt kann nach Kerle, et al. (2007) mittels folgender Ungleichung beschrieben werden:

$$\mu_{min} \geq \mu_{erf} \text{ mit } 40^\circ \leq \mu_{erf} \leq 50^\circ. \quad (5.7)$$

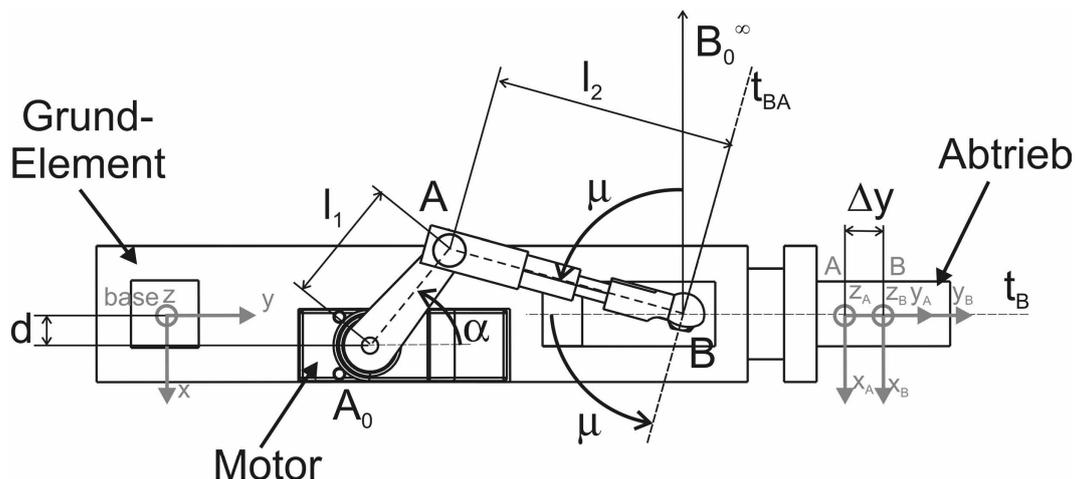


Abbildung 5.6: Festlegung der Nomenklatur für die Elemente der Schubkurbel sowie geometrische Betrachtung der Qualität der Bewegungsübertragung durch Bestimmung des Übertragungswinkels  $\mu$ .

## 3. Bestimmung der direkten Kinematik, Durchführung der Berechnungen

Die Berechnung der direkten Kinematik zur Bestimmung des Verfahrensweges des Schubgelenkmoduls in Abhängigkeit von der Motorstellung  $\alpha$  wurde mit Hilfe geometrischer Betrachtungen durchgeführt. Dabei konnte durch Einbeziehung von Randbedingungen die Anzahl zu berücksichtigender Sonderfälle reduziert werden. So kann angenommen werden, dass der Lenker  $l_2$  stets größer ist als die Differenz der Lenkerlänge  $l_1$  mit dem Abstand  $d$  der Motorwelle zur Mitte des Führungselements (Exzentrizität). Weiterhin kann festgelegt werden, dass  $l_2 \gg l_1$ . Andernfalls würde die Gefahr von Strecklagen (Singularitäten) entstehen und der Arbeitsbereich der Antriebskinematik dadurch deutlich eingeschränkt werden. Bei zu kurzer Länge  $l_2$  bestünde ohne Berücksichtigung der oben (bei der Definition der Lenkerlängen) bereits



$$y = \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \cdot l_1 + l_2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{d}{l_2}\right)^2}. \quad (5.8)$$

$$y' = \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \cdot l_1 - \left(-\frac{l_1}{l_2} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{d}{l_2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{d}{l_2}\right)^2}}. \quad (5.9)$$

$$\mu = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{d}{l_2}\right)^2}\right). \quad (5.10)$$

#### 4. Abschätzung des Einflusses geometrischer Variationen

Zur Abschätzung des Einflusses der Lenkerlängen auf die Eigenschaften der Linearführung wurden Bewegungssimulationen durchgeführt. Hierbei wurden die in Tabelle 5.3 aufgezeigten Lenkerkombinationen verwendet. Die auftretende horizontale Bewegung des Schubgelenks, die Übertragungsfunktion erster Ordnung, welche dem Übersetzungsverlauf gleichzusetzen ist, sowie der während der Bewegung auftretende Übertragungswinkel wurden in Relation zu einer konstanten Antriebsdrehzahl gesetzt. Hieraus wurden nachfolgend aufgezeigte Abhängigkeiten ersichtlich.

Der Verfahrenweg der Führung ist hauptsächlich von der Länge des Lenkers  $l_1$  abhängig. So kann der maximale Verfahrenweg in etwa mit der doppelten Lenkerlänge  $l_1$  gleichgesetzt werden. Durch die Vorgabe der Lenkerlänge  $l_2$  wird der Verfahrenweg wenig beeinflusst. Diese beeinflusst jedoch den Übertragungswinkel, dessen Mittelwert bei einer Erhöhung der Länge  $l_2$  steigt. Weiterhin wird der Übertragungswinkel verbessert, je mehr die Lage des Gelenks zwischen den beiden Lenkern (am Punkt  $A_1$ ) mit der Lage der Bewegungsachse der Gleitführung übereinstimmt, d.h. je ähnlicher die Werte von  $d$  und  $l_1$  sind. Als Resultat hieraus sollte bei der Auslegung darauf geachtet werden,  $l_2$  möglichst lang zu wählen. Zudem sollte  $l_1$  der Exzentrizität  $d$  möglichst ähnlich sein, was jedoch einem hohen Verfahrenweg entgegenstehen würde. Da der Übertragungswinkel ohnehin im gesamten Bewegungsbereich der Antriebskinematik durchwegs als sehr gut anzusehen ist, kann letztere Maßregel vernachlässigt werden. Bei Betrachtung der Übertragungsfunktion erster Ordnung, der durch die Kurbel verursachten Übersetzung [mm/°], wird der Maximalwert mit abnehmender Lenkerlänge  $l_1$  geringer. Von den aktuell geometrisch möglichen Längen des Lenkers  $l_2$  war die Übersetzung jedoch weitestgehend unabhängig. Abbildung 5.8 zeigt beispielhaft die Relation der Abtriebsbewegung mit dem Drehwinkel des Motors sowie die über die mögliche Führungslänge auftretenden Übertragungswinkel und Übersetzungen. Für das weitere Vorgehen wurde die hierbei simulierte Konfiguration mit einer Länge  $l_1$  von 15 mm sowie einer Länge  $l_2$  von 43 mm aufgrund der maximalen

Bewegungslänge bei sonst annähernd gleichwertigen Eigenschaften für die Realisierung des Schubgelenks der Größe 5, mittlere Reihe, verwendet.

Der in den Berechnungen betrachtete Bewegungsbereich von  $180^\circ$  kann aufgrund des maximalen Drehwinkels des Motors von ca.  $120^\circ$  nicht voll ausgenutzt werden. Daher hat eine Festlegung des durch den Motor abgedeckten Bewegungsbereichs zu erfolgen. Hierbei erscheint es sinnvoll, einen Bereich mit möglichst konstantem Hub, Übertragungswinkel sowie gleichmäßiger Übersetzung zu wählen. Daher wurde der Winkelbereich von  $30^\circ$  bis  $150^\circ$  ausgewählt.

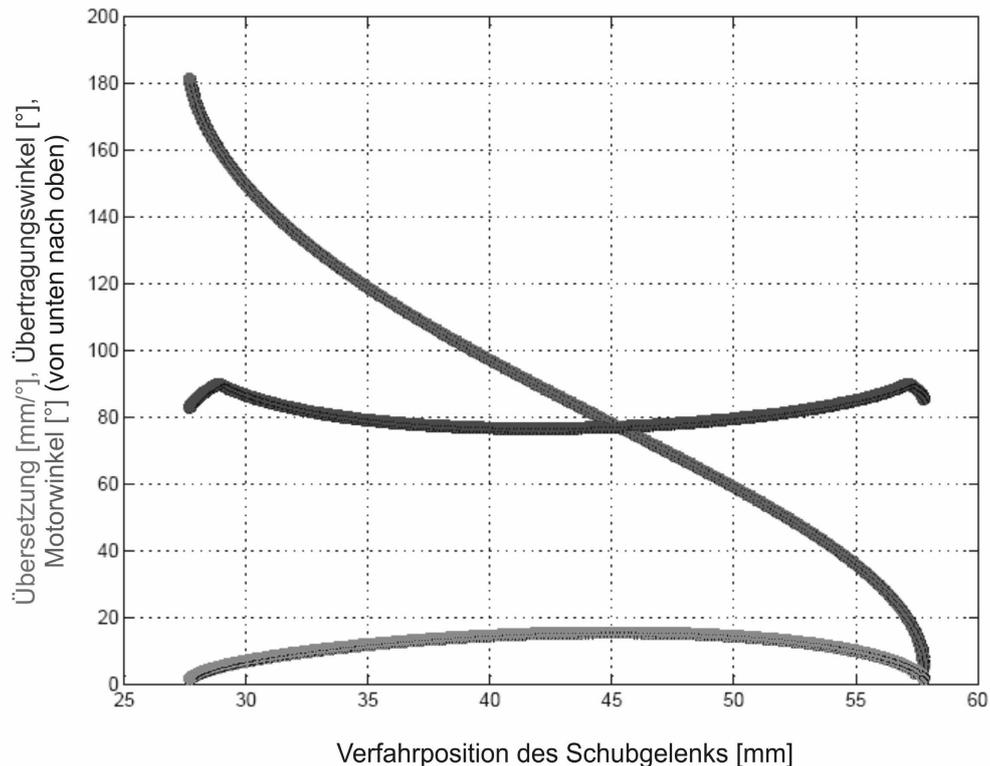


Abbildung 5.8: Simulation des Hubs des Schubgelenks (oben), des dabei auftretenden Übertragungswinkels (Mitte) sowie des Übersetzungsverhaltens (unten) in Abhängigkeit vom Motorwinkel. Als Beispielkonfiguration wurde ein Schubgelenk mit einer Lenkerlänge  $l_1$  von 15 mm,  $l_2$  von 43 mm sowie einer Exzentrizität  $d$  von 5 mm verwendet.

### 5.3.3 Statische Eigenschaften der Elemente

In Abhängigkeit von der Auswahl des für die Baukastenelemente verwendeten Materials (RP-Material, Kunststoffe, Metalle etc.) kann die statische Festigkeit der Elemente neben dem auftretenden Spiel sowie der Relaxation des Baumaterials erheblichen Einfluss auf die Verformung der Bauteile des Roboters und damit die Genauigkeit dessen Positions- und Bewegungserfüllung ausüben. Um eine Aussage über die Zielerfüllung des Systems treffen zu können, muss also der Einfluss dieser Fehlerquellen, z. B. durch die Abschätzung der Verformung, bekannt sein. Hierzu ist in erster Linie die Kenntnis der aufgrund der Eigengewichte der Bauelemente sowie möglicher Lasten auftretenden Belastungen erforderlich. Daneben müssen die stati-

schen Eigenschaften der Bauelemente wie deren Flächenträgheitsmomente ( $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$ ), aber auch die Torsionsflächenmomente ( $I_t$ ) bekannt sein. Auf Basis dieser Daten können die auftretende Durchbiegung oder auch die Torsion der Bauelemente ermittelt werden. Weiterhin kann auf mögliches Versagen der Bauteile durch zu hohe Spannungen im Material geschlossen werden.

Als Grundlage der Untersuchung der statischen Eigenschaften der verwendeten Bauelemente werden zunächst deren Schwerpunkte bestimmt. Bei homogenen Elementen liegen diese grundsätzlich auf dem Schnittpunkt der Symmetrieachsen. Im aktuellen Fall sind die Bauteile jedoch aus mehreren Einzelkomponenten unterschiedlicher Dichte  $\rho$  zusammengesetzt und zudem nicht in allen ihren Bauteilachsen symmetrisch aufgebaut. Nachfolgend wird die Bestimmung des Schwerpunktes am Beispiel eines Schubgelenks (Länge 5, Baugröße  $m$ ) durchgeführt welches aus zwei Teilelementen, dem individuell angefertigten RP-Bauteil sowie dem integrierten Antrieb, aufgebaut ist. Das mittels Polyurethan infiltrierte RP-Bauteil besitzt eine auf Basis von Messungen ermittelte Dichte  $\rho_{RP}$  von ca.  $130 \text{ kg/m}^3$ . Das Gewicht des Motors  $G_{akt}$  wurde zu 9,3 Gramm bestimmt. Der Einfluss der Antriebskinematik auf die Schwerpunktslage wird aufgrund deren geringen Gewichts, der zentrischen Anordnung und damit auch seines geringen Beitrages vernachlässigt. Somit können die Komponenten  $x_s$ ,  $y_s$  sowie  $z_s$  des Schwerpunkts, ausgehend vom Referenzkoordinatensystem (*base*) des Schubgelenks, wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} x_s &= \frac{1}{F_G} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n x_{iRP} \cdot \rho_{RP} \cdot V_{iRP} + x_{akt} \cdot F_{G_{akt}} \right], \\ y_s &= \frac{1}{F_G} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n y_{iRP} \cdot \rho_{RP} \cdot V_{iRP} + y_{akt} \cdot F_{G_{akt}} \right], \\ z_s &= \frac{1}{F_G} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n z_{iRP} \cdot \rho_{RP} \cdot V_{iRP} + z_{akt} \cdot F_{G_{akt}} \right]. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Dabei stellt  $F_G$  das Gesamtgewicht des Gelenkmoduls,  $F_{G_{akt}}$  die Gewichtskraft des Antriebs, sowie  $V_{iRP}$  die Teilvolumina des RP-Bauteils dar, mittels welcher dieses angenähert werden kann.  $x_{iRP}$ ,  $y_{iRP}$  sowie  $z_{iRP}$  stellen je die Entfernungen der einzelnen Schwerpunkte der Teilvolumina,  $x_{akt}$ ,  $y_{akt}$ ,  $z_{akt}$  die Abstände des Schwerpunktes des Antriebs, vom Referenzkoordinatensystem (*base*) dar. Auf die gleiche Weise kann für die Drehgelenke sowie die starren Kinematikelemente vorgegangen werden. Die ermittelten Koordinaten der Schwerpunkte für die im angefertigten Baukasten verwendeten einzelnen Bauelemente sind in Abbildung 5.9 aufgezeigt.

Die Schwerpunkte der Bauelemente stellen eine Voraussetzung zur Ermittlung der Verformung der Bauelemente aufgrund des Eigengewichts der Kinematik mit Hilfe der Flächenträgheitsmomente sowie Torsionsflächenmomente dar. Letztere variieren entlang der Längsachsen der Bauelemente durch deren veränderliche Querschnitte. Vereinfacht werden nachfolgend jedoch nur die Flächenträgheitsmomente an der

schwächsten Bauteilstelle betrachtet. Werden bei deren Betrachtung in den späteren Berechnungen die Grenzen der maximalen Durchbiegung der Baukastenelemente eingehalten, liegt auch die reale Verformung damit sicher unterhalb der Toleranzgrenzen der Spezifikation.

Elementart	Größe	Schwerpunktlage (in mm)		
		x	y	z
starres Element (S)	2	0	16.2	0
	3	0	27.5	0
	5	0	49.3	0
	7	0	70.6	0
Schubgelenk (P)	5	3.6	41.8	0
	7	3.6	59	0
Drehgelenk, gewinkelt (R)	3	0	30	-6.9
Drehgelenk, axial (R)	2	0	12.3	-10.6

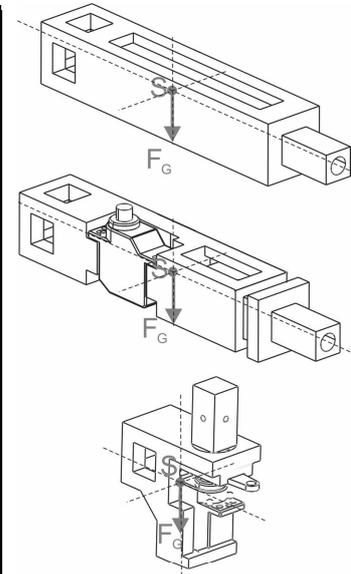


Abbildung 5.9: Komponenten der Schwerpunktlagen der verwendeten Baukastenelemente in ihrer Ruhelage (in mm), betrachtet in Abhängigkeit vom Referenzkoordinatensystem (*base*). In bewegtem Zustand wird der Wert der *y*-Komponente der Schubgelenke leicht erhöht.

Die größten Belastungen auf beispielsweise die Schubgelenke ergeben sich bei deren maximaler Auslenkung. Hier verursacht dann die auftretende Gewichtskraft der nachfolgenden Bauelemente das größte Biegemoment. Da die Belastung der Komponenten mit einer einseitigen Einspannung zu vergleichen ist, wird diese auch hier linear größer, je näher sich der betrachtete Querschnitt an der Einspannstelle (Verbindung zu vorhergehendem Gelenk) befindet. Weiterhin befindet sich zum Beispiel bei einem Schubgelenk der Ort des geringsten Flächenträgheitsmoments im Bereich dessen Antriebs. Er ist auf eine einzelne rechteckige Fläche zurückzuführen (Abbildung 5.10). Bei korrektem Einbau des Schubgelenks ergeben sich die Flächenträgheitsmomente zu den in Formel (5.12) für die Biegung um die *x*- sowie die *z*-Achse aufgezeigten Größen (Beitz & Grote, 2001). Dabei wird angenommen, dass die Krafteinleitung in das Bauteil mittig erfolgt. Hierdurch ist es notwendig, das Flächenträgheitsmoment in *z*-Richtung mit Hilfe der Steiner-Anteile durch die Verschiebung  $\bar{x}_s$  an die aktuelle Lage der Hauptachsen anzupassen. Weiterhin gehen die Profilfläche *A* sowie deren Abmessungen (*b*, *h*) in die Berechnungen mit ein.

$$I_{\bar{x}} = I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} \tag{5.12}$$

$$I_{\bar{z}} = I_z + \bar{x}_s^2 \cdot A = \frac{h \cdot b^3}{12} + \bar{x}_s^2 \cdot A$$

Zur Auslegung der starren Elemente einer Kinematik müssen wiederum die auftretenden Flächenträgheitsmomente berechnet werden. Dabei befindet sich der Querschnitt mit der größten Belastung sowie dem geringsten Flächenträgheitsmoment abermals am Übergang des Lenkers zum Käfig zur Verbindung mit dem vorherigen Bauteil. Er besteht an dieser Stelle aus zwei rechteckigen Flächen. Beim Einbau der Elemente sollte darauf geachtet werden, dass sich die Seitenflächen des Elements ( $h_1, h_2$ ) parallel zur Belastungsrichtung befinden. Die Flächenträgheitsmomente  $I_x$  und  $I_z$  können analog zum Schubgelenk ermittelt werden. Dabei muss lediglich deren Zusammensetzung aus der Summe zweier Teilträgheitsmomente berücksichtigt werden, was am Beispiel des Trägheitsmoments um die z-Achse mittels Formel (5.13) beschrieben wird.

$$I_z = \sum I_{z_i} = I_{z_1} + \bar{x}_{s1}^2 \cdot A_1 + I_{z_2} + \bar{x}_{s2}^2 \cdot A_2 = \frac{h_1 \cdot b_1^3}{12} + \bar{x}_{s1}^2 \cdot A_1 + \frac{h_2 \cdot b_2^3}{12} + \bar{x}_{s2}^2 \cdot A_2. \quad (5.13)$$

Die Ermittlung der Flächenträgheitsmomente der Drehgelenke geschieht auf dieselbe Weise. Dessen Minimum befindet sich hier am Übergang des Verbindungskäfigs hin zur Anbindung des vorherigen Elements. Der in die Bauelemente integrierte Motor stellt durch die Art seiner Anbindung lediglich eine zusätzliche Belastung für das Gelenk dar, er trägt jedoch nicht zur Erhöhung des Flächenträgheitsmoments des Bauteils bei. Die zu berücksichtigende Schnittfläche stellt einen rechteckigen Querschnitt dar, dessen optimale Orientierung bezüglich der auftretenden Belastungen nicht gewährleistet werden kann. Daher ist für die Berechnung vom worst case, der in Abbildung 5.10 aufgezeigten Biegung um die x-Achse, auszugehen. Formel (5.14) zeigt die Berechnung des Flächenträgheitsmoments dieser Biegung.

$$I_{\bar{x}} = I_x + \bar{z}_s^2 \cdot A = \frac{b \cdot h^3}{12} + \bar{z}_s^2 \cdot A. \quad (5.14)$$

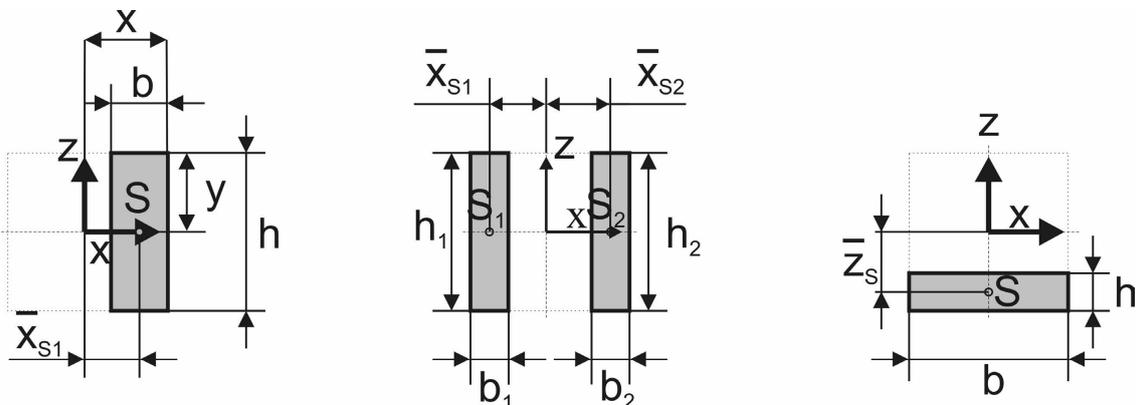


Abbildung 5.10: Querschnitte der geringsten Flächenträgheits- sowie -widerstandsmomente der Schubgelenke, der starren Elemente sowie der Drehgelenke.

Neben der Biegebelastung können auf die Bauelemente bei axialem Versatz nachfolgender Bauteile zusätzlich Torsionsmomente wirken. Zur vollständigen Erfassung

des Belastungszustandes müssen auch diese berücksichtigt werden. Dabei sollte wiederum vom jeweiligen worst case der Belastung ausgegangen werden. Hierfür ist zunächst für jedes Bauelement das Torsionsflächenmoment individuell zu ermitteln, wobei von denselben Querschnitten wie bei der Biegung ausgegangen werden kann.

Unter Kenntnis der aus der Gewichtskraft nachfolgender Bauelemente resultierenden Belastungen und Momente auf die Bauteile, deren Flächenträgheitsmomente sowie dem Elastizitätsmodul des verwendeten Materials kann mittels Biegelinien (Beitz & Grote, 2001) die auftretende Verformung der Bauteile berechnet werden. Daneben kann auch die auftretende Verdrehung mit Hilfe des Torsionsflächenmoments sowie des jeweiligen Schubmoduls und der Bauteillänge bestimmt werden.

Weiterhin können die in den Bauteilen auftretenden Spannungen ermittelt werden. Hierfür sind in Abhängigkeit vom verwendeten Material mehrere Hypothesen, beispielsweise die von-Mises-Vergleichsspannungen sowie die Normalspannungshypothese möglich. Bei Annahme eines zähen Werkstoffes kann so beispielsweise mittels der von-Mises-Vergleichsspannungen (Formel (5.15)) die maximal auftretende Belastung  $\sigma_{v,max}$  ermittelt und hierdurch auf mögliches Versagen des Materials geschlossen werden (Gross et al., 2007). Dabei wird angenommen, dass das Biegemoment  $M_{max}$  jeweils rein entlang der  $y$ -Achse der Gelenke wirkt. Weiterhin kann ein durch nachfolgende Elemente verursachtes Torsionsmoment  $M_t$  in das Element eingebracht werden. Zur Berechnung der Vergleichsspannung ist in Abhängigkeit von der Form des Baukastenelements die Ermittlung des Widerstandsmoments  $W_x$  um die  $x$ -Achse sowie des Torsionswiderstandsmoments  $W_T$  notwendig. Diese sind aus dem Quotient der Flächenmomente mit dem zugehörigen Abstand der Randfasern der Querschnitte von der Biegeachse zu berechnen.

$$\sigma_{v,max} = \sqrt{\left(\frac{|M_x|_{max}}{W_x}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_t}{W_t}\right)^2}. \quad (5.15)$$

Bei Verwendung von RP-Prozessen ist die Herstellung von Prototypen aus unterschiedlichen Materialien möglich. So können die obigen Betrachtungen auch einen Beitrag zur Auswahl des zu verwendenden Materials leisten. Unter Kenntnis der für das verwendete Material maximal zulässigen Spannung  $\sigma_{zul}$ , bei den aktuell mit Polyurethan infiltrierten Bauteilen ca. 40 N/mm<sup>2</sup>, kann so der Spannungsnachweis erbracht und damit die Tauglichkeit des Materials sichergestellt werden. Hierfür muss der Betrag der zulässigen Spannung größer sein als die maximal auftretende Vergleichsspannung (Formel (5.16)).

$$\sigma_{v,max} \leq \sigma_{zul}. \quad (5.16)$$

Durch additive Verknüpfung der oben bereits erwähnten, aufgrund der Belastungen auftretenden, Verformungen der Bauteile kann zudem die resultierende Abweichung der Position des tool center points von der angestrebten Position berechnet werden.

Hierdurch ist es möglich, die Positioniergenauigkeit des robotischen Systems abzuschätzen. Um dem Zusammenbau von Kinematiken aus mehreren Teilelementen Rechnung zu tragen, werden wie bereits erwähnt bei der Auslegung eines Elementes die Massen der jeweils nachfolgenden als Lasten mit berücksichtigt. Dabei ist jeweils die Stellung der kinematischen Kette im worst case zu betrachten. Hierzu werden die dem betrachteten Element folgenden Teilelemente in ihrer Gelenkstellung derart angeordnet, dass deren Gesamtschwerpunkt maximalen Abstand vom betrachteten Element bzw. dessen Biege- oder Torsionsachse besitzt.

Durch die Verwendung von RP-Prozessen zur Anfertigung von Kinematik-Elementen (siehe Kapitel 6.2.1) können in kurzer Zeit Prototypen erstellt werden. Diese besitzen jedoch aufgrund der verwendeten Materialien sowie der Fertigungsprozesse höhere Maßabweichungen als mit herkömmlichen Fertigungsverfahren produzierte Komponenten. Diese Ungenauigkeiten der Elemente können bei der Montage unbeabsichtigt eine nicht exakt rechtwinklige oder parallele Ausrichtung zweier aufeinander folgender Bauteile bewirken. Dies stellt eine weitere Fehlerquelle in der Positioniergenauigkeit des Systems dar. Ohne entsprechende Kompensation können die zu realisierenden Positionen/Orientierungen des Werkzeugs am *tcp* dann nicht exakt erreicht werden.

Nachfolgend werden mögliche, aus Ungenauigkeiten während der Montage resultierende Verdrehungen und Verschiebungen eines Baukastenelements aufgezeigt. Neben den Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Elementen sind davon auch die Bereiche der Bewegungsrealisierung innerhalb einzelner Gelenkelemente betroffen.

Die verwendeten Elementverbindungen bestehen, wie in Kapitel 6.2.1 näher beschrieben, aus einem rechteckigen Innenteil sowie einem Außenteil mit rechteckiger Aussparung. Idealerweise passen die beiden Schnittstellen spielfrei ineinander. Um dies annähernd gewährleisten zu können, wurden Fertigungsversuche mit der verwendeten RP-Anlage zur Beseitigung dieser Ungenauigkeiten durchgeführt. Dennoch sind Abweichungen unvermeidbar. Diese können jedoch abgeschätzt und später durch entsprechende Ansteuerung der Kinematik kompensiert werden. Nachfolgend wird dies am Beispiel einer quadratischen Verbindung mit einer Seitenlänge  $s$  von 8 mm sowie einer Länge  $l$  von 10 mm, entsprechend der Verbindungsschnittstelle zweier Elemente, aufgezeigt (Abbildung 5.11). Hierzu wird für jedes Bauelement eine sich negativ auswirkende Toleranz von 0,1 mm angenommen. Eine Verkippung ist daher in den beiden Achsenrichtungen  $x$  sowie  $z$  möglich. Von einer Begrenzung des Montagefehlers durch die Stirnflächen des Elements wird aufgrund der bei der Bolzenlänge ebenfalls auftretenden Fertigungstoleranz abgesehen. Dieser zweite mögliche Anschlag wirkt den auftretenden Ungenauigkeiten jedoch generell entgegen.

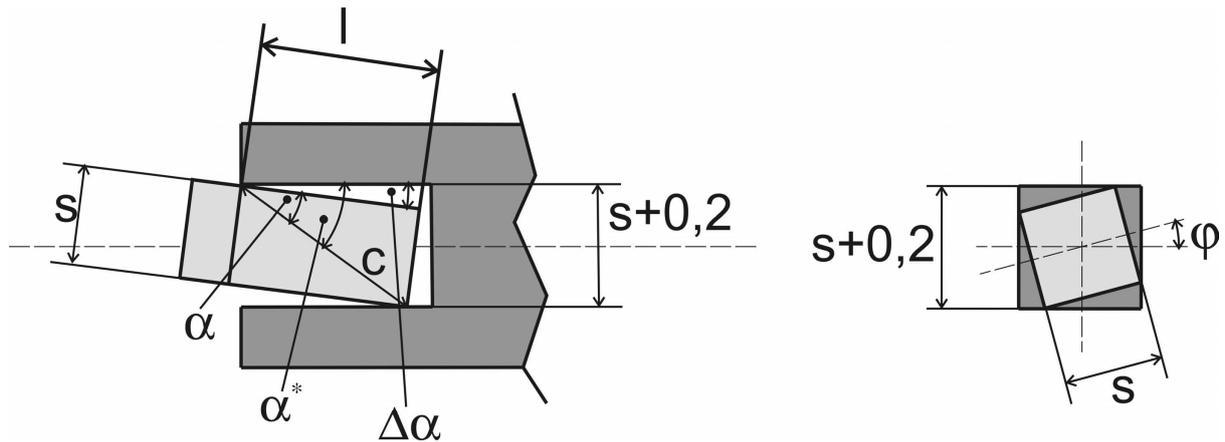


Abbildung 5.11: Darstellung möglicher, aufgrund von Spiel an der Montageschnittstelle zweier aufeinander folgender Bauelemente resultierender Verkippungen bzw. Verdrehungen sowie der zu deren Berechnung notwendigen Parameter.

Die mögliche Verkippung wird definiert als der Winkel  $\Delta\alpha$ . Zu dessen Berechnung erfolgt zunächst die Ermittlung der Länge der Diagonalen  $c$  des Bolzens der Verbindung (Formel (5.17)). Daraufhin können die beiden durch diese sowie die Längsseite  $l$  des Blocks bzw. die Seitenfläche der Nut eingeschlossenen Winkel  $\alpha$  sowie  $\alpha^*$  berechnet werden (Formel (5.18)). Die Differenz aus diesen beiden Winkeln entspricht nachfolgend der Verkippung des Elements ((5.19)).

$$c = \sqrt{l^2 + s^2}. \quad (5.17)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{s}{c}\right), \quad \alpha^* = \arctan\left(\frac{s+0,2}{\sqrt{c^2 - (s+0,2)^2}}\right). \quad (5.18)$$

$$\Delta\alpha = \alpha^* - \alpha. \quad (5.19)$$

Im aktuell betrachteten Fall beträgt der Winkel, welcher sich zwischen dem betrachteten Element und dem Folgeelement einstellt ca.  $1,18^\circ$ . In Abhängigkeit von der Länge des folgenden Elements wirkt sich diese Winkelabweichung mehr oder weniger stark in Form von Positionsabweichungen aus. Da die Abweichung durch das Verkippen beim Schubgelenk beispielsweise sowohl in der  $x$ - als auch in der  $z$ -Koordinatenrichtung auftreten kann, entsteht eine Gesamtabweichung. Diese setzt sich aus der Kombination der einzelnen Abweichungen zusammen. Aufgrund der jeweiligen, konfigurationsbezogenen Ausrichtung des Gelenkelements wird sich der Großteil der Abweichung jedoch stets in einer Koordinatenrichtung auswirken.

Neben den Verkippungen kann sich auch eine Verdrehung zwischen zwei aufeinander folgenden Bauteilen (bei Schubgelenken um deren Längsachse  $y$ ) einstellen. Zu deren Berechnung werden die Diagonale der Stirnfläche des quaderförmigen Bolzens sowie die Abmessungen der Aussparung herangezogen. Der Winkelfehler ergibt sich dabei zu maximal:

$$\varphi_{\max} = -\frac{\pi}{4} + \arcsin\left(\frac{s+0,2}{\sqrt{(2 \cdot s)^2}}\right). \quad (5.20)$$

Besteht die betrachtete serielle Kinematik aus mehreren Elementen, so können sich die Fehler der einzelnen Gelenke aufaddieren.

Weitere mögliche Fehlerquellen in Bezug auf die Gesamtkinematik des Baukastensystems sind beispielsweise eine Verdrehung oder auch der Versatz des Abtriebselements des Drehgelenks im Lager oder aber auch in den Antrieben auftretende Fehlerquellen wie Umkehrspiel etc. Letztere sind hauptsächlich von der Qualität der verwendeten Standard-Bauelemente (Antriebe etc.) abhängig und somit nur schlecht beeinflussbar. In Abhängigkeit von der Art der Beeinträchtigung können hierfür ebenfalls Fehlerabschätzungen getroffen werden.

Neben der Schwerpunktlage und den aufgrund der Fertigung erreichbaren Genauigkeiten besitzen die Bauelemente mit dem Bounding-Box-Modell eine weitere, von der durchgeführten Bewegung unabhängige, statische Repräsentation. Im Vergleich mit weiteren Geometriemodellen wie den STL-Flächenmodellen oder auch aus einzelnen Voxel-Volumina erstellten Volumenmodellen bietet das Bounding-Box-Modell eine sehr grobe Näherung der Bauteilgeometrie. So werden in den Modellen allein die Außenabmessungen der einzelnen Kinematikbausteine abgebildet. Für den aktuell beschriebenen Beispielbaukasten mit neun Elementen der sechsten Reihe mittlerer Baugröße sind die entsprechenden Bounding-Boxes in Abbildung 5.12 aufgezeigt.

Elementart	Element Nr.	Punkt 1 (von base)			Punkt 8 (von base)		
		x	y	z	x	y	z
starres Element, stationary (S)	2	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	31.50	10.50
	3	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	52.50	10.50
	5	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	94.50	10.50
	7	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	136.50	10.50
Schubgelenk, prismatic (P)	5	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	94.50	22.60
	5 (a)	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	124.20	22.60
	7	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	136.50	22.60
7 (a)	-10.50	-10.50	-10.50	10.50	166.20	22.60	
Drehgelenk, gewinkelt, rotatory (R)	2	-10.50	-10.50	-30.70	10.50	31.50	10.50
Drehgelenk, axial, rotatory (R)	3	-10.50	-10.50	-26.00	10.50	55.50	10.50

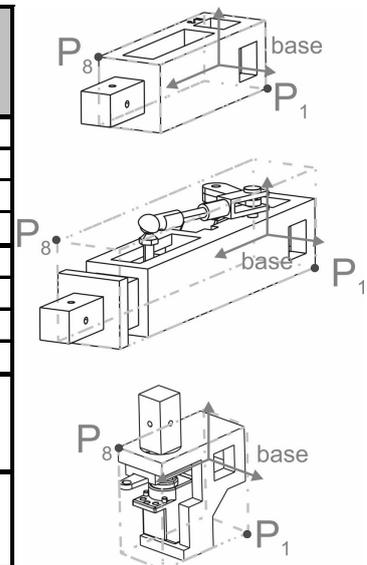


Abbildung 5.12: Koordinaten der definierten, die Bounding-Box aufspannenden Punkte der Elemente der sechsten Reihe mittlerer Baugröße des Kinematikbaukastens sowie die zugehörigen geometrischen Abbildungen. Für die Schubgelenke werden jeweils zwei Varianten, in vollständig eingefahrenem sowie in maximal ausgefahrenem Zustand (a) definiert.

Ausgehend vom Zentrum des *base*-KOS jedes Elements wurden hierzu zwei begrenzende Punkte definiert, welche die Bounding-Box aufspannen. Um beim Zusammenbau einzelner Bauelemente Überschneidungen der Bounding-Boxes zu vermeiden wird das hintere, standardisierte Verbindungselement (Käfig) jeweils dem aktuell betrachteten Element, das vordere (Zapfen) dem Folgeelement zugeordnet. Für die Schubgelenke werden zwei Bounding-Boxes, jeweils bei maximalem sowie minimalem Hub, definiert.

### 5.3.4 Kinetische Eigenschaften der Elemente (Massenträgheitsmoment etc.)

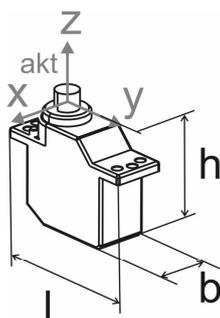
Die kinetischen Eigenschaften eines Mechanismus/Roboters sind zu einem großen Teil von dessen Antrieb abhängig. An diesen werden aufgrund der beim hier betrachteten Mechanismenbaukasten auftretenden Randbedingungen unterschiedliche Anforderungen gestellt. So soll der Antrieb aufgrund dessen Integration in die Bauelemente möglichst kleine Abmessungen besitzen. Daher ist bei der Antriebsauswahl neben der Vorgabe eines hohen Drehmoments auch auf ein hohes Leistungsvolumen zu achten. Darüber hinaus sind eine intuitive und einfache Bedienung bzw. Ansteuerung sowie geringe Kosten erforderlich. Zur Vereinfachung des Aufbaus der betrachteten Bauelemente ist darüber hinaus ein hoher Grad der Integration weiterer Funktionen im Antrieb wünschenswert.

Zur Realisierung des Antriebs der Roboterelemente wurde daher die Verwendung von Modellbau-Servoantrieben gewählt. Diese bieten eine vergleichsweise kostengünstige Kombination eines Gleichstrommotors mit einem Getriebe, einem Winkelmesssystem sowie elektronischen Baugruppen zur Ansteuerung des Motors. Aufgrund dieser integrierten Komponenten ergibt sich großes Einsparpotential hinsichtlich weiterer Bauelemente. So ist durch die integrierte indirekte Positionsmessung keine separate Sensorik zur Bestimmung der aktuellen Position eines betrachteten Gelenks notwendig. Die durch das indirekte Messverfahren auftretende Verringerung der Genauigkeit, kann aufgrund des Einsatzzwecks der Kinematikelemente vernachlässigt werden. Weiterhin ist durch integrierte Logikbausteine auch eine Funktionalität zum Halten einer definierten Position vorhanden und muss nicht mehr separat implementiert werden. Damit ist bei kurzer Einschaltdauer auch der Einsatz mechanischer Bremsen nicht notwendig. Nachteilig wirkt sich jedoch, speziell bei den gewählten Antrieben (Futaba S3156), der durch den Wertebereich der Sensorik vorgegebene, eingeschränkte Bewegungsbereich aus. Dieser beträgt bei den aktuellen Antrieben  $\pm 60^\circ$ . Daher wird auch während der nachfolgenden Synthese der verfügbare Variationsbereich der Stellungen der Gelenke und Führungen eingeschränkt. Deren Grenzen bilden dann der minimale Drehwinkel  $\alpha_{min}$  sowie der maximale Drehwinkel  $\alpha_{max}$ . Mit der Laufvariablen  $i$  der Winkelvariation sowie deren Maximalwert  $i_{max}$ , welcher die Anzahl der Variationsschritte der Gelenkwinkel und damit die Auflösung der Mechanismenentwicklung definiert, kann der für die einzelnen Schritte der Variation geltende Gelenkwinkel  $\alpha_i$  mittels Formel (5.21) ermittelt werden. Dabei ist  $i_{max}$  von der durch die Antriebe realisierbaren Auflösung abhängig.

$$\alpha_j = \alpha_{\min} + \frac{j}{j_{\max}} \cdot (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}), \text{ für } j = 0 \dots j_{\max}. \quad (5.21)$$

Der aktuell eingesetzte Antrieb hat bei einer Größe von 21,8x11x21,9 mm ( $l, b, h$ ) ein Gewicht von 9,3 Gramm. Mit einer Stellkraft von 20 Ncm sowie einer Haltekraft von 50 Ncm besitzt der Motor daher ein hohes Leistungsvolumen. Die maximal erreichbare Geschwindigkeit beträgt 0,09 sec/45°. Zudem kann die Versorgungsspannung zwischen 4,8 V und 6 V variiert werden. Durch seine geringe Größe ist der Antrieb gut in die Elemente des Kinematikbaukastens zu integrieren. So kann gewährleistet werden, dass der mögliche Bewegungsraum des Roboters durch die integrierten Bauelemente so wenig wie möglich eingeschränkt wird. Das vergleichsweise hohe maximale Drehmoment des Motors erlaubt einen Verzicht auf Lagerungen zwischen zwei zueinander zu bewegenden Kinematikelementen. Die Ausgangswelle des Motors befindet sich wie bei den meisten Modellbau-Servoantrieben seitlich versetzt (Abbildung 5.13). In ihrem Zentrum liegt auf Höhe des Angriffspunktes des Servohebels das bereits vorgestellte Antriebskoordinatensystem *akt*.

Für die Kinematikelemente der kleinen sowie der großen Reihe mit 14 mm bzw. 28 mm Kantenlänge der Stirnfläche ist erneut je ein derartiger, standardisierter Antrieb zu verwenden. Beide Antriebe sollen dabei ebenfalls sowohl für den Antrieb der Schubkurbel der prismatischen Führung als auch zum Antrieb der Drehgelenke verwendet werden. Die möglichen Abmessungen dieser Antriebe wurden in Abbildung 5.13 zur Einhaltung der Größenverhältnisse extrapoliert. Aufgrund der parametrisierten Hinterlegung der Bauelemente im Mechanismenbaukasten ist eine exakte Extrapolation der Antriebsabmessungen jedoch nicht notwendig. Durch Anpassung der Bauelemente können auch weitere, individuell ausgewählte Antriebe verwendet werden.



	Antriebsabmessungen		
	kleine Reihe (s)	Reihe (m)	große Reihe (l)
Länge l	14.4	21.8	29.0
Breite b	7.3	11.0	14.6
Höhe h	14.5	21.9	29.1

Abbildung 5.13: Der verwendete Motortyp zur Aktuierung der Bauelemente der mittleren Baugröße des Mechanismen-Baukastens sowie dessen Abmessungen. Zusätzlich sind durch Extrapolation ermittelte, ungefähre Abmessungen möglicher Antriebe der kleinen sowie der großen Baureihe angegeben.

Zur Bewegung einer seriellen Kinematik hinsichtlich der Erfüllung einer definierten Bahn ist die Vorgabe der exakten Verfahrensgeschwindigkeiten aller Antriebe notwendig. Hierbei ist speziell bei den Schubgelenken die durch die Antriebskinematik vorgegebene ungleichmäßige Übersetzung zu beachten. Durch diese sowie die eigentliche Bewegungsbahn ergeben sich nicht konstante Geschwindigkeitsverläufe für die An-

triebe. Mittels dieser Verläufe kann, nach Festlegung der Massenträgheitsmomente der einzelnen Kinematikelemente auch auf das maximal notwendige Antriebsdrehmoment geschlossen werden. Hierdurch kann die Realisierbarkeit der Bewegung mit Hilfe des ausgewählten Motors und somit dessen Tauglichkeit abgeschätzt werden.

Die aktuell verwendeten Kinematikelemente erlauben nur eine parallele (axiale) oder eine rechtwinklige Anbindung weiterer Elemente. Daher sind direkte Drehungen einzelner Elemente jeweils nur um zu deren Hauptachsen parallele Achsen möglich, wobei die Hauptträgheitsmomente relevant sind. Während der Bestimmung der Massenträgheitsmomente bei serieller Anordnung mehrerer Elemente, insbesondere bei variierten Winkelstellungen der Drehgelenke, treten auch Deviationsmomente auf. Da jedoch zur Abschätzung der Motortauglichkeit nicht jeder, sondern nur der maximale Wert des aufzubringenden Drehmoments zu bestimmen ist, kann zur Vereinfachung die Auslegung auf Winkelstellungen beschränkt werden, bei welchen die jeweiligen Hauptträgheitsmomente auftreten. Somit kann auch die Berechnung des Trägheitstensors auf die Komponenten  $\theta_{xx}$ ,  $\theta_{yy}$  sowie  $\theta_{zz}$  beschränkt werden.

Die Geometrie der Bauelemente wird zur Bestimmung der Hauptträgheitsmomente vereinfacht aus homogenen, quaderförmigen Komponenten, analog der Abmessungen der Bounding-Boxes, aufgebaut. Das zu bewegende gesamte Massenträgheitsmoment  $\theta_z$  um die Achse eines Drehgelenks ergibt sich dann durch Addition der Massenträgheitsmomente der gesamten, auf das betrachtete Gelenk folgenden kinematischen Struktur aus  $n$  Einzelementen (Formel (5.22)).

$$\theta_z = \sum_{i=1}^n \left[ \theta_{\max_i} + (x_{S_i}^2 + y_{S_i}^2) \cdot m_i \right]. \quad (5.22)$$

Dabei wird jeweils das größte vorkommende Hauptträgheitsmoment  $\theta_{\max}$  jedes Elements verwendet (worst case). Der Bezug der Trägheitsmomente auf die aktuelle Drehachse erfolgt mit Hilfe des Satz von Steiner und den hierbei maßgebenden Abständen  $x_{S_i}$ ,  $y_{S_i}$  sowie  $z_{S_i}$  des Schwerpunktes des betrachteten Gliedes der Kinematik zur Drehachse. Tabelle 5.4 zeigt die Hauptträgheitsmomente der starren Elemente sowie der Dreh- und Schubgelenke. Dabei werden bei den Schubgelenken wiederum zwei Zustände, ausgefahren sowie eingefahren, betrachtet.

Mit Hilfe des jeweiligen Gesamtträgheitsmoments  $\theta_z$  aus den Massenträgheitsmomenten der einzelnen Bauteile sowie der Winkelbeschleunigung  $\ddot{\varphi}$  kann auf die notwendigen Drehmomente  $M_a$  sowie die erforderliche Leistung der Antriebe bezüglich der Beschleunigung der Kinematik geschlossen werden. Zur Ermittlung des notwendigen Gesamtmotormoments müssen jedoch auch das aus der Kompensation der Gewichtskraft resultierende Moment  $M_G$  sowie das Moment  $M_R$  zur Überwindung der Reibung in den Lagern berücksichtigt werden. Dabei müssen Dreh- sowie Schubgelenke separat betrachtet werden, da sich die zu berücksichtigenden Belastungen, unter anderem aufgrund der verschiedenen Auswirkung der Reibung aus unterschiedlichen Komponenten zusammensetzen.

Tabelle 5.4: Hauptträgheitsmomente der Elemente des Mechanismenbaukastens der sechsten Reihe der mittleren Baugröße: starre Elemente, Schub- sowie Drehgelenke.

		Hauptträgheitsmomente [kg*m <sup>2</sup> ], Trägheit [kg]		
		$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$
Starres Element (S)	Länge 2	0.024	0.010	0.024
	Länge 3	0.048	0.010	0.048
	Länge 5	0.124	0.010	0.124
	Länge 7	0.239	0.010	0.239
Schubgelenk (P)	Länge 5	0.131	0.017	0.124
	Länge 5 (a)	0.208	0.017	0.201
	Länge 7	0.246	0.017	0.239
	Länge 7 (a)	0.350	0.017	0.343
Drehgelenk (R)	radial, L=2	0.037	0.023	0.024
	axial, L=3	0.062	0.019	0.052

Die zu berücksichtigenden Schwerkraften  $F_{G,i}$  bilden mit den Abständen  $y_{S,i}$  der Schwerpunkte der Elemente vom Drehpunkt des Antriebs ein Moment, für welches vom Antrieb ein Gegenmoment aufgebracht werden muss. Der dabei jeweils geltende Hebelarm kann mittels der absoluten Abstände  $y_{S,i}$  sowie dem Winkel  $\alpha$  gegenüber der Horizontalen bestimmt werden. Den worst case der Bewegung eines Drehgelenks stellt die Beschleunigung eines Bauelements mit einer parallel zur Schwerkraft ausgerichteten Bewegungsrichtung, d. h. bei  $\alpha = 0^\circ$ , dar. Der Hebelarm beträgt dann  $y_{S,i}$ . Für die notwendige Einbeziehung des Reibmoments sind in Abhängigkeit von der aktuellen Gelenkausrichtung zwei mögliche Fälle denkbar. Bei der in Abbildung 5.14 aufgezeigten Kinematik ist, aufgrund der vertikal ausgerichteten Gleitflächen zwischen den Elementen sowie der nicht vorgesehenen Vorspannung, lediglich die Reibung in den Lagern zu berücksichtigen. Das Reibmoment setzt sich dann aus dem Produkt der Anpresskraft (senkrecht wirkende Gewichtskraft der Folgeelemente), dem Reibungskoeffizienten  $\mu_r$  sowie dem Lagerradius  $r_{Lager}$  als Hebelarm zusammen. Bei horizontal ausgerichteten Gleitflächen ergibt sich das Reibmoment aus dem Produkt des mittleren Reibradius mit der Anpresskraft sowie dem Reibkoeffizient. Beispielhaft aufgezeigt erhält man für ein Drehgelenk mit einem nachfolgenden Element folgendes notwendiges Antriebsdrehmoment:

$$\begin{aligned}
 M_{gesamt,dreh} &= M_G + M_a + M_R = \\
 &= F_{G,1} \cdot y_{S,1} \cdot \cos(\alpha) + \theta_{max,1} \cdot \ddot{\varphi} + F_{G,1} \cdot r_{Lager} \cdot \mu_r.
 \end{aligned}
 \tag{5.23}$$

Folgt dem auszulegenden Element mehrere Teilelemente, berechnet sich das notwendige Gesamtmoment  $M_{gesamt}$  aus der Summe der durch die Teilelemente verursachten Momente.

Für die Berechnung des notwendigen Moments eines Schubgelenks (Abbildung 5.15) wird analog vorgegangen. Der worst case eines Schubgelenks kann mit dem vertikalen Beschleunigen der kompletten Last angenommen werden. Im Gegensatz

zum horizontalen Verschieben, bei welchem die Gewichtskraft der nachfolgenden Glieder die Normalkraft der Reibungsberechnung bildet, kann beim vertikalen Heben der Reibungseinfluss in der Führung vernachlässigt werden. Für andere Situationen würde sich die Reibkraft aus der Anpresskraft der senkrecht zur Reibfläche ausgerichteten Gewichtskomponenten nachfolgender Glieder der Kinematik sowie dem Reibkoeffizient bestimmen lassen.

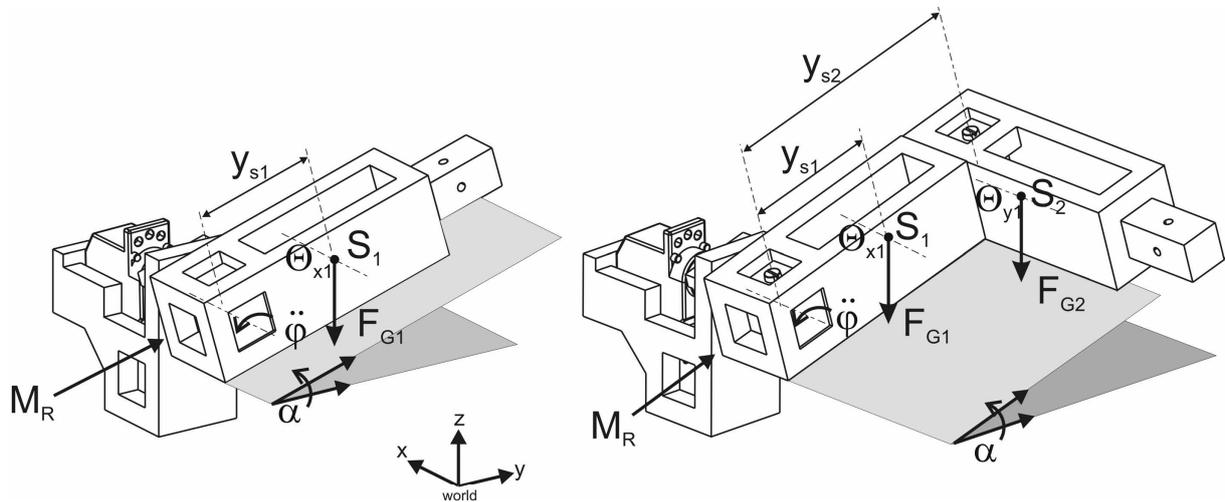


Abbildung 5.14: Darstellung sowie Bezeichnung der Einflussfaktoren auf das benötigte Drehmoment des Antriebs eines Drehgelenks: Trägheit, Gewichtskraft, Reibung.

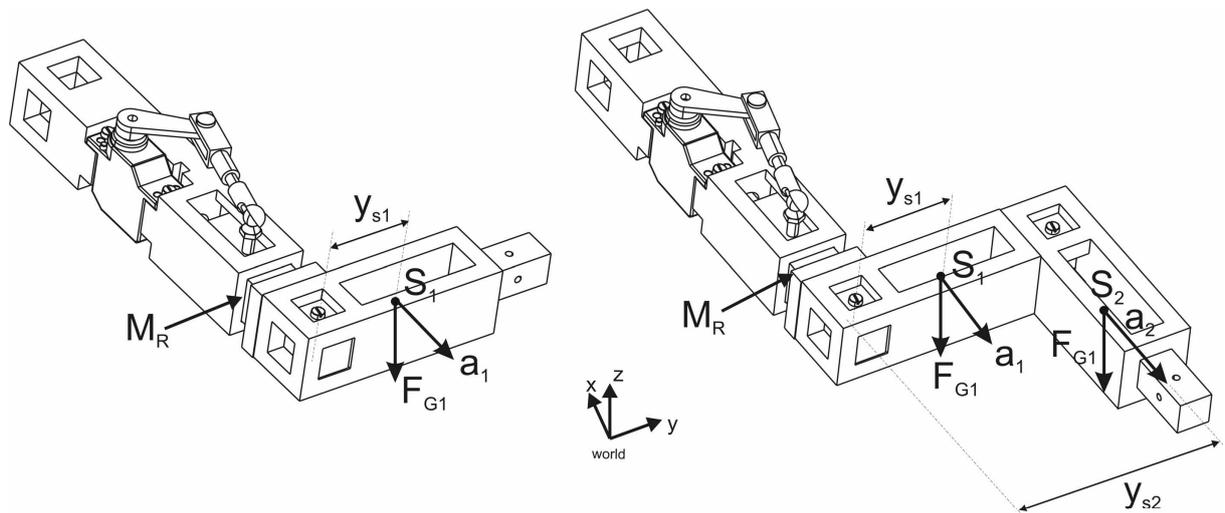


Abbildung 5.15: Darstellung zweier Einsatzszenarien eines Schubgelenks sowie der Bezeichnungen der Einflussfaktoren auf das benötigte Drehmoment des Antriebs.

Das notwendige Gesamtdrehmoment ist beim Schubgelenk zusätzlich von der aktuellen Übersetzung der Antriebskinematik abhängig, da im Gegensatz zum oben betrachteten Drehgelenk die Einleitung der Bewegung beim Schubgelenk indirekt über

das Schubkurbelgetriebe geschieht. Die notwendige translatorische Beschleunigung  $a$  muss auf eine rotatorische zurückgeführt werden, welche von der aktuellen Übersetzung und damit der Winkelstellung  $\alpha$  des Servohebels  $l_1$  am Antrieb abhängt. Auch hier muss das aufzubringende Gesamtmoment in Abhängigkeit von der Position des betrachteten Elements in der kinematischen Kette bei Bedarf auf mehrere Elemente zurückgeführt werden. In diesem Fall wird es wiederum aus der Summe der durch die Elemente verursachten einzelnen Teilmomente berechnet.

Generell sind speziell bei Verwendung von Rapid-Prototyping-Prozessen häufig die Eigenschaften der gefertigten Bauelemente (z. B. Reibungsfaktoren) nicht exakt bekannt. Um den damit verbundenen Effekten und benötigten höheren Drehmomenten dennoch Rechnung zu tragen, können die bekannten Drehmomentkomponenten zusätzlich durch Sicherheitsfaktoren ergänzt werden.

## 6. Realisierung ausgewählter Systemkomponenten sowie der Prototypenausgabe

Nach der Ausgestaltung des Mechanismenbaukastens soll nachfolgend auf die Implementierung einzelner Komponenten des Systems zur anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung sowie die Ausgabe von Prototypen näher eingegangen werden. Dazu werden die aktuellen Realisierungen der Soft- und Hardwarekomponenten sowie zusätzlich mögliche Erweiterungen vorgestellt. Das aktuelle Kapitel gliedert sich daher in folgende Bereiche:

- Realisierung der Kinematikentwicklung (Bau- und Arbeitsraumdefinition, Systemvariation und Bewertung entwickelter Systeme)
- Ergebnisaufbereitung und Prototypenausgabe mittels Rapid Prototyping
- Aktuierung der Prototypen

### 6.1 Realisierung der Kinematikentwicklung

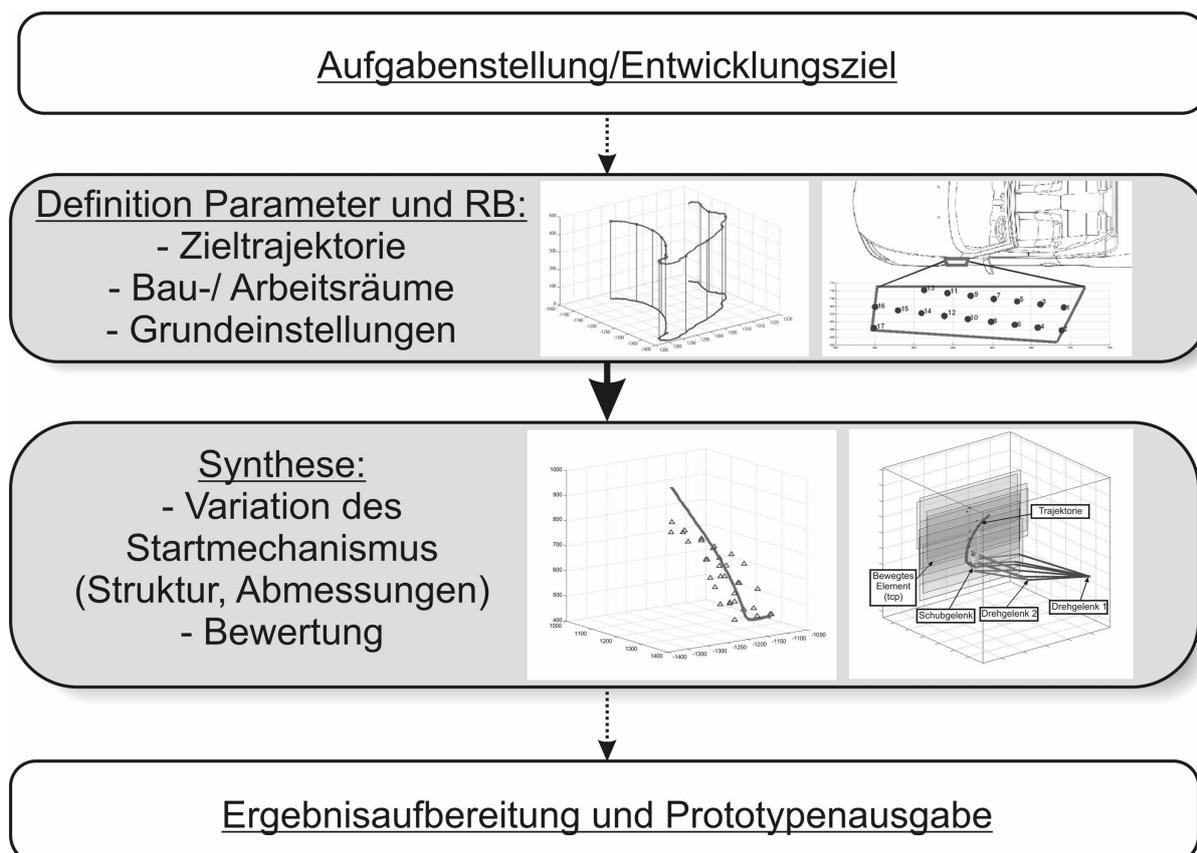


Abbildung 6.1: Eingliederung der Durchführung der Kinematikentwicklung, bestehend aus der Definition der Parameter und Randbedingungen sowie der Synthese, zwischen die Festlegung der Aufgabenstellung sowie die Ausgabe des Entwicklungsergebnisses (Bilder teilweise entnommen aus Fischer, et al. (2008) sowie Fischer, et al. (2009)).

Für die spätere Anwendung und somit Validierung des gesamten oben vorgestellten Mechanismenbaukastens sowie der in Kapitel 6.2 aufgezeigten Methoden zur Ausgabe und Untersuchung des Syntheseergebnisses wurde beispielhaft ein Verfahren zur Kinematikentwicklung implementiert (Abbildung 6.1).

Das Syntheseverfahren enthält die Realisierung der bereits vorgestellten Konzepte zur Definition der zu realisierenden Trajektorien sowie zur Festlegung von Bau- und Arbeitsräumen. Darüber hinaus beinhaltet es eine Variation der Parameter des betrachteten Systems und die Bewertung der ermittelten Teilergebnisse. Die von Richter, et al. (2009) entwickelte und in Kapitel 4.2.3 bereits erwähnte Methode zur Bahnvorgabe wurde bei der vorgestellten anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung lediglich angewendet und soll daher nicht weiter vertieft werden.

### **6.1.1 Realisierung der Bau- und Arbeitsraumdefinition**

Zur exakteren Abstimmung der entwickelten Kinematik auf das Zielsystem wurden Verfahren zur Vorgabe von Bau- und Arbeitsräumen entwickelt und implementiert. Die Bauräume dienen als Randbedingung für eine Variation der Platzierung von Kinematikelementen während der Synthese. Durch die Ermittlung der Arbeitsräume können Hindernisse im Bauraum für die spätere Durchführung einer Kollisionserkennung während der Pfadplanung und Synthese definiert werden. Zur Vorgabe dieser beiden Randbedingungen können jeweils dieselben, in Abhängigkeit vom Entwicklungsfortschritt des Systems eingesetzten Vorgehensweisen, verwendet werden. Aufgrund dieser Analogie beschränkt sich im Folgenden die Beschreibung deren Definition anhand von Skizzen oder aber auch mittels STL-Daten auf das Beispiel der Bauraumdefinition.

Werden Skizzen für die Definition von Bauräumen verwendet, erfolgt nach deren Digitalisierung zunächst eine Konvertierung in ein Schwarzweissbild. Die darin enthaltenen Umrisse der vorhandenen Geometrien sind, in Abhängigkeit von der Qualität der Skizze sowie der Digitalisierung, als offene oder geschlossene Flächen zu erkennen. Da für die Weiterverarbeitung geschlossene Flächen benötigt werden, wird im Anschluss ein Vergrößerungsfilter zum Schließen unbeabsichtigt offener Flächen (z. B. Erode-Filter) verwendet. Mittels des Mauszeigers wird daraufhin eine Position im Bild, welches eine zweidimensionale Matrix aus Punkten darstellt, innerhalb eines gewünschten Bauraums ausgewählt. Von dieser Position aus werden alle senkrecht entlang der  $y$ -Koordinatenrichtung nach unten auftretenden Pixel hinsichtlich ihrer Farbe untersucht. Wird dabei ein erster schwarzer Punkt erreicht, dient dieser als erster Punkt einer die ausgewählte Fläche eingrenzenden Kontur. Von diesem Punkt aus werden daraufhin weitere schwarze Punkte gesucht. Der dabei wiederum als erstes gefundene Punkt wird als nächster Randpunkt des Bauraumes definiert. Dieser Vorgang wird bis zur vollständigen Schließung der Kontur, d. h. der erneuten Detektion eines bereits detektierten Punktes, wiederholt. Zuletzt wird ein Polygonzug durch die aufeinander folgenden Punkte gelegt. Im Rahmen der Arbeitsraumdefinition stellt dieser Polygonzug direkt ein Hindernis dar. Sollen jedoch Bauräume

festgelegt werden, folgt die Ermittlung der maximalen bzw. minimalen Koordinatenwerte des Polygonzuges in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Aus diesen wird daraufhin ein Rechteck gebildet, in welches ein Raster diskret verteilter Anlenkpunkte gelegt wird (Abbildung 6.2). Diese werden während der Parametervariation der Synthese weiter verwendet.

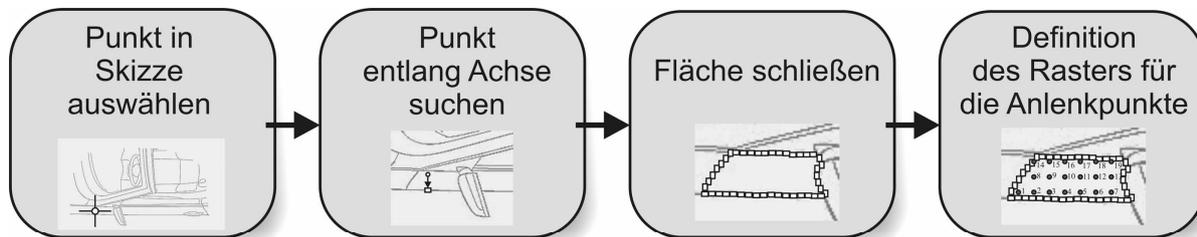


Abbildung 6.2: Vorgehen zur Definition des verfügbaren Bauraumes mittels einer digitalisierten Skizze.

Bei der Verwendung von STL-Dateien zur Bauraumdefinition wird zunächst, ebenso in mehreren Schritten, eine Ermittlung deren Schnittfläche mit einer Ebene auf einer gewünschten Höhe durchgeführt. Dabei wird zum Teil auf in Schneider und Eberly (2003) beschriebene Verfahren aus der Computergrafik zurückgegriffen.

Innerhalb des Vorgehens zur Schnittflächenermittlung wird zunächst die Lage der Dreiecke der STL-Datei relativ zur Schnittebene überprüft. Hierfür werden durch den Zusammenhang

$$d_p = \frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{a})}{\|\mathbf{n}\|} \quad (6.1)$$

die Abstände  $d_p$  der einzelnen Dreieckspunkte  $p$  mit Hilfe der Normalen  $n$  und dem Aufpunkt  $a$  aus der Ebenendefinition berechnet. Aus der Lage dieser Punkte zur Schnittebene kann die aktuelle Schnittsituation ermittelt werden. Dabei kann zwischen Dreiecken, welche die Ebene nicht, sowie weiteren, welche die Ebene in einem einzelnen Punkt oder aber auch in zwei oder mehr Schnittpunkten schneiden (z. B. Dreiecksseite in Ebene), unterschieden werden. Nachfolgend wird beispielhaft der Schnitt eines Dreiecks, für den Fall dass sich dessen Eckpunkte alle außerhalb der Ebene befinden, näher betrachtet. Zunächst wird dabei der einzelne, auf einer Seite der Ebene liegende Punkt als Aufpunkt ausgewählt. Mit diesem Punkt  $p_1$  und einem weiteren Punkt  $p_2$  auf der anderen Seite der Ebene wird die Ausrichtung  $dir$  der entsprechenden Seite des gebildeten Dreiecks berechnet:

$$\mathbf{dir} = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2. \quad (6.2)$$

Hierauf wird der Abstand  $d_o$  des Punktes von der Schnittebene mit Hilfe des Normalenvektors  $n$  und dem Aufpunkt  $a$  der Ebene berechnet (Formel (6.3)). Der Ursprung des Hauptkoordinatensystems wird dabei mit  $o$  bezeichnet.

$$d_o = \frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{o} - \mathbf{a})}{\|\mathbf{n}\|}. \quad (6.3)$$

Daraufhin kann der unbekannte Anteil  $t_P$  der Geradengleichung der Dreiecksseite berechnet werden:

$$t_P = -\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}_1 + d_o}{\|\mathbf{n} \cdot \mathbf{d}_p\|}. \quad (6.4)$$

Zuletzt lässt sich mittels der vollständigen Geradengleichung der Ebenenschnittpunkt  $\mathbf{s}$  ermitteln:

$$\mathbf{s} = \mathbf{p}_1 + t_P \cdot \mathbf{dir}. \quad (6.5)$$

Die Verbindung dieses Schnittpunktes mit dem zweiten, analog ermittelten Schnittpunkt der weiteren Dreiecksseite stellt ein Element der Schnittgeometrie dar. Nachdem dieses Vorgehen für alle Dreiecksseiten durchgeführt wurde, werden die erhaltenen Schnittpunkte der Reihenfolge nach sortiert und aus ihnen, analog zum Vorgehen bei Verwendung von Konzeptskizzen, ein Polygon gebildet. Soll nun eine automatisierte Weiterverarbeitung geschehen, muss eine Differenzierung der erhaltenen Flächen nach freien Bauräumen oder aber auch bereits verbrauchten Flächen außerhalb der Geometrie (Einschränkungen des Arbeitsraumes) erfolgen. Dies kann unter Verwendung der in den STL-Dateien enthaltenen Flächennormalen geschehen. Zuletzt werden, wiederum analog zur Vorgehensweise bei der Verwendung von Skizzen, mögliche Anlenkpunkte für die Kinematik ermittelt (Abbildung 6.3).

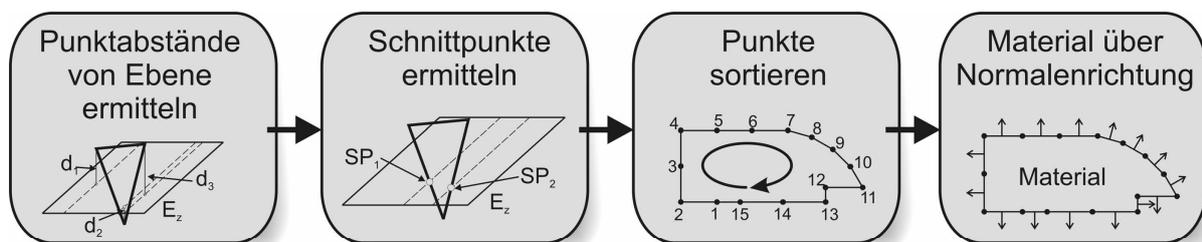


Abbildung 6.3: Vorgehen zur Definition der Bau- und Arbeitsräume mittels bereits vorhandener STL-Daten des Systems.

Vor der Verwendung der ermittelten Bau- sowie Arbeitsräume müssen diese mit der vorgegebenen Trajektorie in Verbindung gebracht werden. Hierfür hat deren Referenzierung hinsichtlich ihrer Position sowie Ausrichtung relativ zur Trajektorie zu erfolgen. Daneben ist gegebenenfalls zusätzlich eine Skalierung notwendig, mit Hilfe derer die Maßstäbe der Trajektorie sowie der ermittelten Räume aneinander angepasst werden (Abbildung 6.4).

Während der Referenzierung werden zunächst die Vorgabe-Komponenten, Trajektorien sowie Räume, von einem gemeinsamen Grundsystem (*world*) aus beschrieben. Dies erfolgt mit Hilfe der Transformationen  ${}^{Bauraum}\mathbf{T}_{world}$  sowie  ${}^{Trajektorie}\mathbf{T}_{world}$ . Dabei ist

neben der reinen Translation auch eine möglicherweise notwendige Verdrehung zu beachten. Der Maßstab der Trajektorie ist aufgrund des zu ihrer Generierung verwendeten Verfahrens mit Hilfe des realen Gesamtmodells zumeist bereits korrekt, ebenso derjenige der mittels STL-Daten generierten Bau- und Arbeitsräume. Für die skizzierten, eventuell auch mit unterschiedlichen Auflösungen digitalisierten Modelle muss er jedoch erst definiert werden. Hierfür wird bereits während des Skizzierens ein Maßstab auf der Skizze vermerkt. Dessen Anfangs- und Endpunkt werden nun am Rechner ausgewählt. Nach einer automatisierten Bestimmung der zwischen den gewählten Punkten enthaltenen Pixel wird vom Anwender die Maßreferenz eingegeben. So kann ein Verhältnis (in m/Pixel) definiert werden. Dieses wird auf das gesamte Bild angewendet.

In den definierten Bauräumen werden, wie oben bereits erwähnt, unter Berücksichtigung der Abmessungen der Gelenke, vor allem deren Durchmesser, mittels der vorab definierten Rasterung mögliche Anlenkpunkte für das erste Gelenk ermittelt. Je kleiner der hierbei verwendete Abstand der Rasterpunkte ausgeführt wird, desto exakter kann die spätere Entwicklung (Kapitel 6.1.2) durchgeführt werden. Jedoch steigt mit der Verkleinerung des Rasters auch der Rechenaufwand.

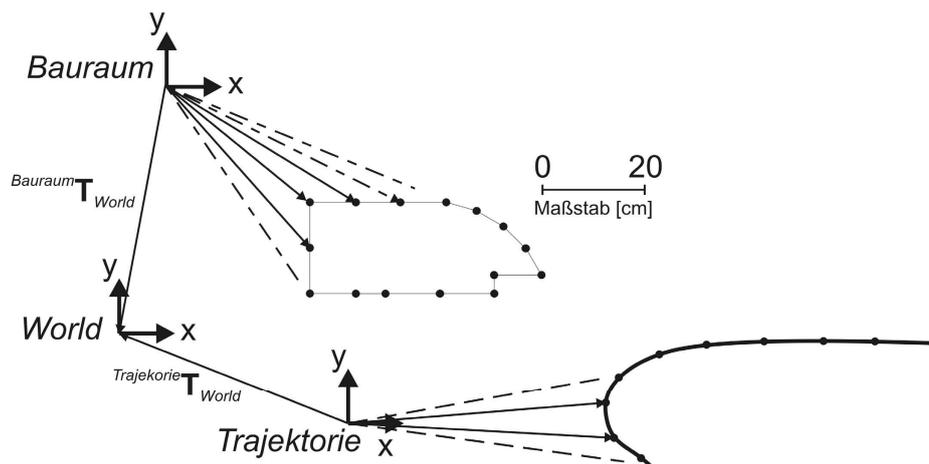


Abbildung 6.4: Referenzierung eines Beispielbauraums gegenüber der vorgegebenen Trajektorie über das *world*-KOS. Der Maßstab ist bei der Trajektorie sowie den mittels STL-Daten definierten Bau- und Arbeitsräumen zumeist bereits korrekt festgelegt. Bei Verwendung von Skizzen hat dessen Festlegung separat zu erfolgen.

## 6.1.2 Systemvariation und Bewertung robotischer Systeme

Für die Entwicklung der Kinematik auf Basis der Vorgabe der Entwicklungsziele sowie der Randbedingungen wurde ein Vorgehen, bestehend aus iterativ durchgeführten Variationszyklen implementiert. Dabei wird auf die Trajektorien- und Bauraumdefinition, bislang jedoch noch nicht auf den vollständigen Funktionsumfang der Repräsentationen des Mechanismenbaukastens zurückgegriffen. So werden während der Entwicklung, wie Kapitel 4.2.3 beschrieben, ausgehend von einer Startkonfiguration, eine Variation der Position des ersten Gelenkes sowie der kinematischen Parameter

(Abmessungen) des Mechanismus durchgeführt. Für jede einzelne dabei entstehende Konfiguration wird daraufhin eine Variation der möglichen Gelenkwinkel durchgeführt. Die Parameter der Konfiguration sowie alle damit während der Gelenkwinkelvariation erreichbaren Frames werden in einer Ergebnisdatei hinterlegt. Zusätzlich können sie am Rechner in einem dreidimensionalen Koordinatenraum angezeigt werden. Wird hierbei auch die zu realisierende Trajektorie angezeigt, können bereits erste Abschätzungen hinsichtlich der Qualität der Ergebniserreichung getroffen werden. Eine Bewertung erfolgt jedoch erst in einem separaten, nachfolgenden Arbeitsschritt mit Hilfe einer variablen Anzahl von Qualitätskriterien.

In Abbildung 6.5 sind beispielhaft die mittels zwei unterschiedlicher kinematischer Konfigurationen erreichbaren Frames einer 3DOF-Kinematik sowie die vorgegebene Trajektorie dargestellt. Bereits hieraus ist ersichtlich, dass die erreichbaren Frames der rechts abgebildeten Konfiguration im Hinblick auf die räumliche Distanz eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der Vorgabetrajektorie erzielen. Diese erste Aussage über die Qualität der entwickelten Kinematik hinsichtlich der Erfüllung der Aufgabenstellung muss jedoch vor der Auswahl der zielführenden Konfiguration zunächst in einer weiter gehenden Bewertung bestätigt werden.

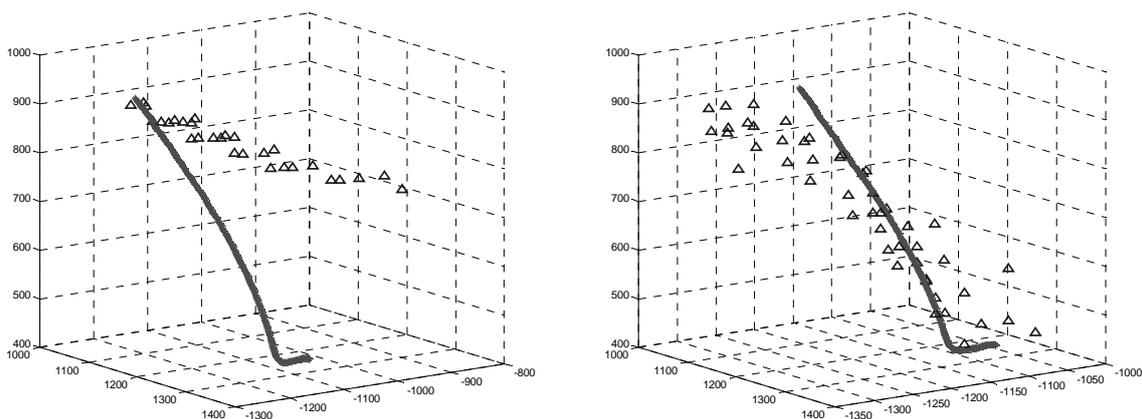


Abbildung 6.5: Darstellung der Positionen mittels zwei verschiedener kinematischer Konfigurationen erreichbarer Frames. Hierbei ist deutlich die unterschiedliche Übereinstimmung mit der Vorgabetrajektorie zu erkennen. Auf eine Verwendung von Koordinatensystemen als Marker wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Mit diesen könnten neben den Positionen jedoch zusätzlich die auftretenden Orientierungen angezeigt werden.

Das Vorgehen zur Bewertung der mit dem vorliegenden System ermittelten Kinematiken sieht die Verwendung unterschiedlich gewichteter Kriterien vor. Diese resultieren nicht zuletzt aus den Vorgaben und Randbedingungen der Entwicklung und bilden somit die Grundlage zur Auswahl erfolgversprechender Konzepte. Die vorgesehenen Kriterien können in vier Gruppen eingeteilt werden, welche diskret sowie kontinuierlich zu beurteilende Komponenten enthalten. Das wichtigste und aktuell implementierte Kriterium stellt das Maß der Erfüllung der Bewegungsaufgabe dar. Weiterhin sind jedoch auch kinematische sowie kinetische Eigenschaften des erstellten

Systems für die Tauglichkeit der gefundenen Lösung relevant. Darüber hinaus können weitere individuell und aufgabenbezogen definierte Randbedingungen verwendet werden. Die erste Kriteriengruppe kann wie folgt näher erläutert werden:

- **Erfüllung der Bewegungsaufgabe:**

Unter dieses Kriterium fallen die nachfolgend näher beschriebene Bewertung hinsichtlich der durch die Zieltrajektorie vorgegebenen Positionen sowie Orientierungen. Neben einer durch die Abweichung von einem Maximalwert definierten Bewertung werden dabei auch Ausschlusskriterien zur Vermeidung zu großer Abweichungen verwendet.

Weiterhin ist bei Verwendung weiterer Repräsentationen des Mechanismenbaukastens eine zusätzliche Bewertung hinsichtlich folgender Kriteriengruppen möglich:

- **Kinematische Eigenschaften:**

In diese Kriteriengruppe fallen alle vom kinematischen Aufbau des Systems abhängigen Eigenschaften. Hierzu zählen der mögliche realisierbare Arbeitsraum, die Neigung zu (Eigen-)Kollisionen, die von der Anzahl der verwendeten Baukastenelemente bestimmte Komplexität der Kinematik oder auch der Flächenverbrauch der zur Zielerfüllung durchgeführten Bewegung.

- **Kinetische Eigenschaften:**

Diese Gruppe von Kriterien umfasst sämtliche, die Aktuierung betreffende Eigenschaften. Hierzu zählen die Notwendigkeit schneller Konfigurationswechsel sowie die aufgrund der Änderungsgeschwindigkeiten der Gelenkwinkel auftretende Motorbeanspruchung während des Betriebs. Weiterhin kann der hiervon abhängige Energieverbrauch der Antriebe mit in die Bewertung einbezogen werden. Ein Hauptziel dieser Kriteriengruppe ist die Erreichung einer gleichmäßigen Ansteuerung in Bezug auf die Änderung der Winkelgeschwindigkeiten sowie der Beschleunigungen. Damit können die Belastungen auf die eingesetzten Antriebe (notwendige Motormomente etc.) verringert werden.

- **Weitere Kriterien:**

In diesen Bereich fallen alle Kriterien, welche nicht den obigen drei Gruppen zugeordnet werden können. Dazu zählen beispielsweise die in den Bereich der Wirtschaftlichkeit der Produktentwicklung fallenden Herstellungskosten des Roboters, der Materialverbrauch, sowie das Robotergewicht oder auch das Design.

Die Bewertung der Abweichung der Positionen der realisierten Bahnpunkte unter Berücksichtigung maximal zulässiger Abweichungen von den vorgegebenen Punkten soll im Folgenden genauer dargestellt werden. So wird für jeden Frame  $i$  der während der Parametervariation realisierten Trajektorie  $(x_{real,i}, y_{real,i}, z_{real,i})$  der Betrag des Abstandes zur vorgegebenen Trajektorie aus  $x_{traj,i}$ ,  $y_{traj,i}$  sowie  $z_{traj,i}$  ermittelt. Dieser wird dann im Verhältnis zum maximal zulässigen Abstand  $dist_{max}$  betrachtet. Auf Basis einer Fallunterscheidung wird der Qualitätswert  $Q_{pos,i}$ , dessen zulässiger Wert

zwischen jeweils einschließlich „0“ sowie „1“ liegt, des einzelnen Frames bestimmt (Formel (6.6)). Dabei stellt ein Qualitätswert von „1“ die beste Bewertung, bei vollkommener Übereinstimmung der erreichbaren mit der vorgegebenen Trajektorie, dar. Ein Wert von „0“ tritt dann ein, wenn in einer Koordinatenrichtung bzw. durch den Gesamtbetrag der einzelnen Abweichungen die maximal zulässige Abweichung erreicht oder überschritten wird.

$$Q_{pos_i} = \begin{cases} 0, & \text{falls } 1 - \left( \frac{\left\| \begin{pmatrix} x_{traj_i} - x_{real_i} \\ y_{traj_i} - y_{real_i} \\ z_{traj_i} - z_{real_i} \end{pmatrix} \right\|_T}{dist_{max}} \right) \leq 0 \\ 1 - \left( \frac{\left\| \begin{pmatrix} x_{traj_i} - x_{real_i} \\ y_{traj_i} - y_{real_i} \\ z_{traj_i} - z_{real_i} \end{pmatrix} \right\|_T}{dist_{max}} \right), & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.6)$$

Zur Beurteilung der Orientierungserfüllung wird grundsätzlich analog vorgegangen. Hierbei besteht zunächst die Möglichkeit der vollständigen Übereinstimmung der erreichten Winkel  $\alpha_{real,i}$ ,  $\beta_{real,i}$  sowie  $\gamma_{real,i}$  mit den vorgegebenen Winkeln  $\alpha_{traj,i}$ ,  $\beta_{traj,i}$  und  $\gamma_{traj,i}$  der Trajektorie. Weiterhin kann die maximale Winkelabweichung  $orient_{max}$  durch eine Winkelkomponente oder den Betrag der Winkelabweichungen erreicht bzw. überschritten werden. Für die Bewertung einer Abweichung innerhalb der Spezifikationen kann wiederum der reguläre Qualitätswert  $Q_{orient,i,regulär}$  unter Verwendung des Quotient der gesamten Abweichung der realisierbaren, verdrehten Frames mit der maximal zulässigen Winkelabweichung gebildet werden (Formel (6.7)). Die Bewertung für eine Abweichung außerhalb der Spezifikationen wird wie oben zu „0“ gesetzt.

$$Q_{orient,i,regulär} = 1 - \left( \frac{\left( \left| \alpha_{traj_i} - \alpha_{real_i} \right| + \left| \beta_{traj_i} - \beta_{real_i} \right| + \left| \gamma_{traj_i} - \gamma_{real_i} \right| \right)}{orient_{max}} \right). \quad (6.7)$$

Der Gesamtqualitätswert der Erfüllung der Bewegungsaufgabe  $Q_{motion}$ , welcher mittels der gefundenen Kinematiklösung erreicht werden kann, wird mit Hilfe der Summe der durch alle Frames erreichbaren Positions- und Orientierungserfüllungen sowie der Gesamtanzahl der Frames  $n_{frames}$  berechnet (Formel (6.8)). Dabei werden zusätzlich die prozentualen Gewichtungen der Positions- sowie Orientierungserfüllung  $w_{pos}$  und  $w_{orient}$  berücksichtigt. Diese können vom Anwender, in Abhängigkeit von deren Relevanz im aktuellen Anwendungsfall, individuell definiert werden. Dabei muss die Summe der Gewichtungen jedoch stets „1“, d. h. 100 % ergeben. Insgesamt bewegt sich so auch der Betrag dieses Qualitätswerts im Bereich von jeweils einschließlich „0“ bis „1“.

$$Q_{motion} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{frames}} (Q_{pos_j}) \cdot w_{pos} + \sum_{j=1}^{n_{frames}} (Q_{orient_j}) \cdot w_{orient}}{n_{frames}} \quad (6.8)$$

Zukünftig sollen auch die kinematischen und kinetischen Eigenschaften des entwickelten Systems sowie weitere Kriterien für eine Bewertung verwendet werden. Dabei könnten die kinematischen Parameter wie die Neigung des Mechanismus/Roboters zu Kollisionen oder der Flächenverbrauch entweder als Ausschlusskriterien oder aber, analog zur Erfüllung der Bewegungsaufgabe, nach der prozentualen Höhe ihrer Erfüllung berücksichtigt werden.

Weiterhin besitzen die entwickelten Kinematiken jedoch auch Eigenschaften wie beispielsweise die Notwendigkeit von Konfigurationswechseln oder die geschätzten Fertigungskosten (z. B. in Abhängigkeit von der Teileanzahl oder der Anzahl der Antriebe), welche diskret auftreten oder aber nur subjektiv bewertet werden können. Hierzu zählen auch der Materialverbrauch oder das Gewicht der Kinematik. In diesen Fällen kann eine gestufte Bewertung mit dabei eingesetzten, gleich verteilten Bewertungsstufen wie „1“, „0,8“, „0,6“ etc. verwendet werden. Hierdurch werden Elemente einer beispielsweise in Lindemann (2009) beschriebenen, gewichteten Punktbewertung durch den Anwender in die Mechanismenauswahl mit eingebracht.

Zuletzt hat eine Zusammenfassung der einzelnen Gruppen der Qualitätsbewertung in einer Gesamtbewertung  $Q_{total}$  zu erfolgen, mit welcher die betrachtete Kinematik in Bezug auf die Erfüllung der gesamten Aufgabenstellung beurteilt werden kann. Dies geschieht durch Addition der Produkte der Teilbewertungen mit deren zugehörigen Gewichtungen (Formel (6.9)), wobei durch letztere die Bewertungsgruppen zueinander priorisiert werden können. Der Betrag des erhaltenen, die Erfüllung der Aufgabenstellung aufzeigenden Qualitätswertes ist aufgrund einer analog zu oben durchgeführten Definition der Gewichtungen, stets zwischen jeweils einschließlich „0“ und „1“. Dabei stellt wiederum eine Bewertung von „1“ eine optimale Erfüllung der Aufgabenstellung durch die Kinematik dar.

$$Q_{total} = Q_{motion} \cdot w_{motion} + Q_{kinematic} \cdot w_{kinematic} + Q_{kinetic} \cdot w_{kinetic} + Q_{add} \cdot w_{add} \quad (6.9)$$

mit  $0 \leq Q_{total} \leq 1$ .

Stehen mehrere Kinematiken zur Wahl, kann mittels dieses Vorgehens zur Bestimmung derer Qualitätswerte ein Ranking vorgenommen und darauf basierend die beste Lösung ausgewählt werden. Zur besseren Veranschaulichung können die Qualitätswerte der Erfüllung der Bewegungsaufgabe, der kinematischen, der kinetischen sowie der weiteren Eigenschaften ( $Q_{motion}$ ,  $Q_{kinematic}$ ,  $Q_{kinetic}$ ,  $Q_{add}$ ) auch graphisch dargestellt werden. Eine Möglichkeit hierzu ist anhand eines Netzdiagramms in Abbildung 6.6 dargestellt. In dem Diagramm werden die zusätzlichen Gewichtungen  $w_{motion}$ ,  $w_{kinematic}$ ,  $w_{kinetic}$  sowie  $w_{add}$  nicht berücksichtigt.

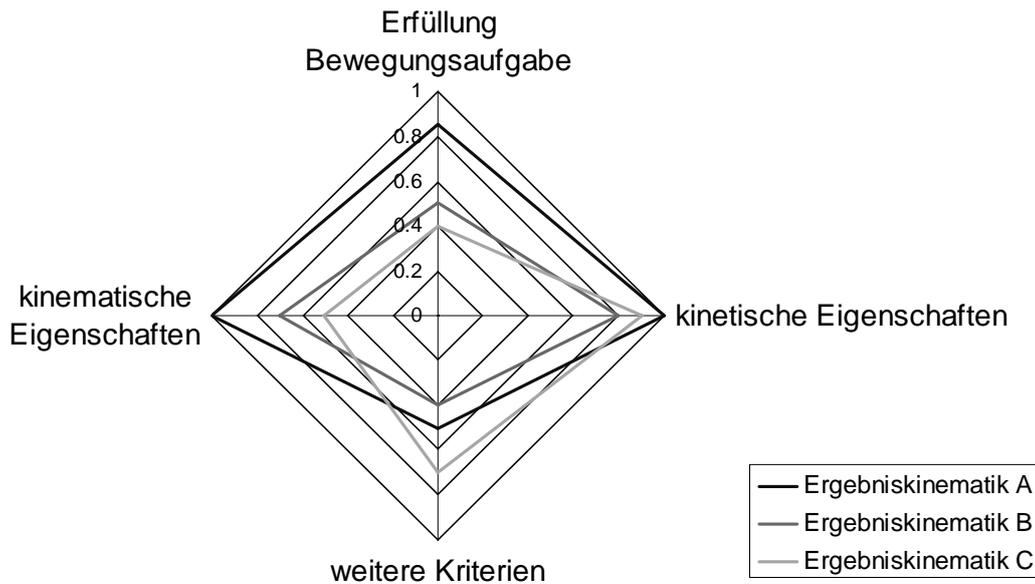


Abbildung 6.6: Darstellung der Teilbewertungen dreier unterschiedlicher Kinematiken hinsichtlich der Erfüllung der Bewegungsaufgabe, der kinematischen und kinetischen Eigenschaften sowie weiterer, individueller Kriterien.

## 6.2 Ergebnisaufbereitung und Prototypenausgabe mittels Rapid Prototyping

Um nach der Entwicklung geeigneter Mechanismen und Roboter dem Anwender intuitiv ein optimales Systemverständnis zu ermöglichen, hat eine geeignete Kommunikation des Entwicklungsergebnisses gegenüber dem Anwender zur Realisierung des bestmöglichen „Erfahrens“ der erstellten Kinematik zu erfolgen. Hierzu sind bei Verwendung des aktuell beschriebenen Entwicklungssystems bereits Hardwareelemente aus dem Mechanismenbaukasten vorhanden oder aber sie werden zeitnah on-demand erzeugt. Die Herstellung erfolgt dabei mittels eines 3D-Druckers, des Spectrum 510 der Firma Z-Corporation. Dabei werden das Material ZP131 (Gips) sowie die Infiltrations-Komponenten PX 100A bzw. B (Polyurethan) verwendet. Neben den Hardware-Modellen werden aber auch abstrakte Informationen in Form von Montageanleitungen oder am Rechner abgebildeten Modellen an den Anwender übergeben. Die Realisierung dieser Ausgabevarianten wird nachfolgend näher erläutert.

### 6.2.1 Bereitstellung der Hardware-Grundelemente mittels 3D-Druck

#### Definition der Bauteil-Schnittstellen und Funktionsumfang der Elemente

Die mit dem Werkzeug zur angepassten Kinematikentwicklung erstellten Mechanismen und Roboter werden nach dem Prinzip des Mechanismenbaukastens aus verschiedenen Grundelementen montiert. Daher stellte die notwendige Möglichkeit zur Verbindung der Bauteile einen wichtigen Aspekt bei deren Auslegung

und Konzeption dar. Als Grundvoraussetzung wurde zudem festgelegt, dass alle Elemente des Mechanismenbaukastens (Starrkörper, aktuierte Gelenke) möglichst stabil und steif miteinander kombinierbar sein sollen. Weiterhin sollen die Herstellung sowie das Lösen der Verbindung einfach und aufwandsarm sowie bei geringen Kosten durchzuführen sein. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der Verbindungsmöglichkeiten, wie auch bereits während der Synthese, auf Verbindungen in Winkeln von  $0^\circ/180^\circ$  bzw.  $90^\circ$  beschränkt.

Für die Gestaltung der Hardwareverbindung der Bauelemente steht grundsätzlich eine Vielzahl von Füge-techniken zur Verfügung, welche historisch in die Bereiche Formschluss, Kraftschluss sowie Stoffschluss eingeteilt werden können (Bauer, 1991). Aufgrund der notwendigen, aufwandsarmen Reversibilität der Verbindung sowie auch des verwendeten Fertigungsverfahrens und Materials kann von der Verwendung von Techniken aus dem Bereich des Stoffschlusses abgesehen werden. Von den formschlüssigen Verbindungen, zu welchen beispielsweise Nietverbindungen, der Bajonettverschluss sowie auch Passfederverbindungen und Rastmechanismen zählen, müssen einige, wie z. B. das Nieten, aufgrund der Voraussetzung der einfachen Lösbarkeit ausgeschlossen werden. Weiterhin wurden in Voruntersuchungen verschiedene Ausführungen von Rastverbindungen getestet. Bei deren Verwendung sind während der Montage Verformungen der Verbindungselemente notwendig. Das aktuell verwendete RP-Material zeigte in den Tests jedoch sehr sprödes Verhalten, so dass beim Versuch der Verbindungsherstellung die Bauteile häufig durch Spröbruch versagten. Hierauf wurde die Verwendung einer, aufgrund der höheren Bauteilanzahl (Schrauben, Muttern etc.) aufwändigeren, Schraubverbindung untersucht. Aufgrund der problemlosen Realisierbarkeit und der einfachen Handhabung wurde diese Verbindungsart daraufhin für das weitere Vorgehen ausgewählt.

Zur Realisierung der Schraubverbindung besitzt jedes Element des Kinematikbaukastens an seinen beiden Enden unterschiedliche Anschlusselemente. Diese sind ein einfacher Quader (Bolzen) sowie eine Gitterstruktur (Käfig), welche jeweils einen Teil der Verbindung darstellen. Durch die kubische, symmetrische Form des Käfigs aus drei gleich langen Seiten sind unterschiedliche Montageausrichtungen des Bolzens, gemäß den geforderten Winkeln, möglich. Um eine Fixierung sowie eine zusätzliche Sicherung gegen ein Verdrehen der beiden Anschlusselemente gegeneinander zu erreichen, wird ein quadratisches Plättchen seitlich in den Käfig eingelegt und über eine Durchgangsbohrungen im Bolzen mit diesem verschraubt. Dabei sind die Verbindungselemente und damit die Verbindung derart ausgeführt (Höhe der Plättchen bzw. der Schraube etc.), dass durch sie keine Einschränkung hinsichtlich der Bewegungsfreiheit des Mechanismus entsteht. So sind sowohl das Plättchen als auch die Schraube und die Mutter nach der Montage vollständig im Käfig eines der Baukastenelemente versenkt (Abbildung 6.7). Anstelle der Schraube/Mutter-Verbindung wäre auch die Verwendung von Gewindeeinsätzen in den Bolzen denkbar. Davon wurde jedoch zu Gunsten einer einfacheren Fertigung abgesehen.

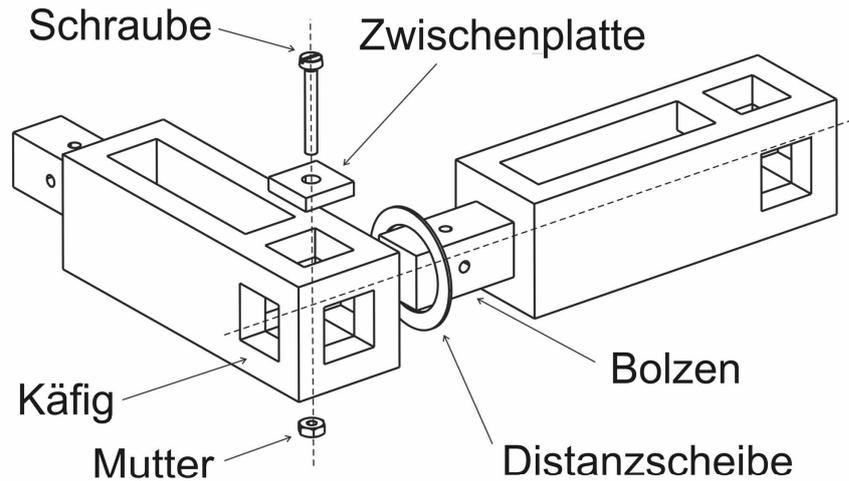


Abbildung 6.7: Montagesschnittstelle der Baukastenelemente am Beispiel zweier starrer Elemente: Formschlüssige Verbindung des Bolzens mit dem Käfig durch Einlegen und Verschrauben einer Zwischenplatte.

Um ein aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten resultierendes Spiel in der Verbindung und damit ein mögliches Verkippen der Bauteile zueinander zu vermindern bzw. zu verhindern, werden Distanzscheiben zwischen die Baukastenelemente eingefügt. Diese werden dem Anwender in unterschiedlichen Höhen (0,1 mm, 0,3 mm sowie 0,5 mm) zur Verfügung gestellt.

Neben der mechanischen Verbindung kann in integrativen mechatronischen Systemen grundsätzlich Energie, Information sowie Material ausgetauscht werden. Dieser Austausch könnte auch zwischen den Teilelementen der hier aufgebauten Kinematiken stattfinden. Aufgrund der Vorgabe, eine möglichst einfache und schnelle Montage der einzelnen Teilelemente zu ermöglichen, wurden diese Austauschmöglichkeiten jedoch beschränkt. Da beispielsweise die Notwendigkeit eines Materialflusses zwischen den einzelnen Bauelementen ohnehin nicht besteht, konnte dieser Aspekt komplett vernachlässigt werden. Eine Versorgung der Bauelemente mit Informationen ist jedoch in Form der Ansteuerungsinformation für die Servomotoren notwendig. Daneben ist zusätzlich auch deren Energieversorgung sicherzustellen. Diese Funktionen sowie eine hierfür denkbare Kommunikation zwischen den Bauteilen untereinander, könnten durch integrierte Versorgungs- und Steuerleitungen sowie Mikrocontroller realisiert werden. Hierfür müsste eine standardisierte elektrische/elektronische Verbindung zwischen den Bauteilen definiert werden. Die gesamte Integration der zusätzlich notwendigen Elektronikkomponenten widerspräche jedoch der im Sinne des Rapid Prototyping schnellen, einfachen sowie kostengünstigen Anfertigung der Bauelemente. Stattdessen wird daher eine zentrale Ansteuerung verwendet. Die Bauelemente selbst besitzen somit keine Steuerungsintelligenz. Auch die Energieversorgung wird von zentraler Stelle aus durchgeführt. Als Hauptvorteil ergeben sich daraus ein wesentlich einfacherer Aufbau der Baukastenelemente sowie eine einfachere Ansteuerung des Systems. So können unterschiedliche Bewegungen derselben Kinematik durch die Neuprogrammierung eines einzelnen Mikrocontrollers realisiert werden. Die bei diesem Ansatz notwendiger Weise außen liegende Verkabelung

zur Energie- sowie Informationsversorgung kann sich jedoch nachteilig auf den Bewegungsbereich des Aufbaus sowie dessen Neigung zu Kollisionen auswirken. So ist bei der Montage und der Verlegung der Verkabelung auf die Vermeidung möglicher Einschränkungen der Bewegungen zu achten.

### Fertigung der Bauelemente und Montage der Baugruppen

Die Fertigung der Elemente des Mechanismenbaukastens wurde mit Hilfe des eingehend erwähnten 3D-Druckverfahrens realisiert. Grundlage hierfür bilden die STL-Repräsentationen der Baukastenelemente. Diese beinhalten parametrisierte Darstellungen der Bauelemente, welche fallspezifisch angepasst werden können. So können beispielsweise Modelle unterschiedlicher Baugrößen zur in Kapitel 5.3.1 erwähnten Erhöhung der Steifigkeit bei längeren kinematischen Ketten oder auch hinsichtlich der Integration neuer Antriebsvarianten angepasste Modelle erstellt werden. Ein Beispiel einer parametrisierten Repräsentation des Mechanismenbaukastens ist in Abbildung 6.8 anhand eines starren Bauelements der Länge 7 dargestellt.

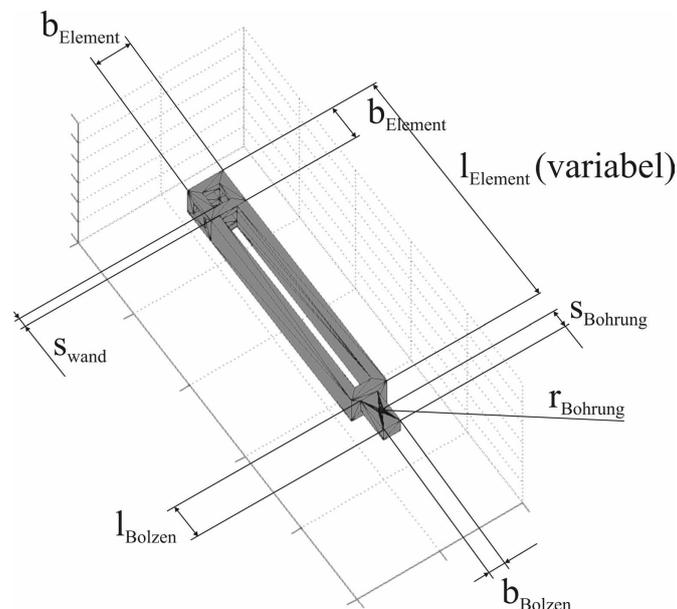


Abbildung 6.8: STL-Repräsentation eines starren Elements der Länge 7 mit Darstellung der einzelnen Parameter. Durch Variation der Parameter können unterschiedliche Derivate (Baugrößen, Längen etc.) der Elemente erzeugt werden.

Die Erstellung der gesamten STL-Repräsentationen hängt von drei Typen von Einflüssen ab: geometrische, technische sowie konstruktive Parameter (Fischer et al., 2008). Die geometrischen Parameter sind die während der Synthese definierten Hauptabmessungen (Lenkerlängen etc.) der Bauteile. Sie beeinflussen die statischen, kinematischen sowie kinetischen Eigenschaften der Baukastenelemente. Durch deren Berücksichtigung kann eine angepasste, durch den Anwendungsfall definierte Repräsentation eines Bauelements ausgegeben werden.

Die technischen Parameter ergeben sich aufgrund der verwendeten Fertigungsverfahren, im vorliegenden Fall des 3D-Druck. Durch deren Änderung kann die STL-

Erstellung und damit die Prototypenausgabe an die Verwendung weiterer Fertigungsverfahren (z. B. Stereolithographie, Lasersintern etc.) angepasst werden. Damit kann den Vorgehensweisen während des Fertigungsprozesses sowie den verwendeten Materialien Rechnung getragen werden. Bei dem aktuell verwendeten Verfahren sowie den eingesetzten Materialien wurde so für eine sichere und ausschussarme Fertigung die Einhaltung minimaler Wandstärken von 2 mm festgelegt. Zur Vermeidung des verfahrensbedingten Stufeneffekts (Gebhardt, 2007) muss bei der Fertigung eine geeignete Ausrichtung der gefertigten Bauteile im Bauraum garantiert werden. Weiterhin wird die, sich aufgrund des verwendeten Materials ergebende, Fertigungsgenauigkeit von 0,089 bis 0,1 mm berücksichtigt. Diese durch das Fertigungsverfahren festgelegten technischen Parameter wie die Fertigungsgenauigkeit können vom Anwender nicht oder nur sehr bedingt beeinflusst werden. Sie tritt speziell bei gepassten Elementen (Führungselemente, Bauteilverbindungen) negativ in Erscheinung und muss daher bei der Bauteilerstellung berücksichtigt und durch Vorversuche eliminiert werden. Darüber hinaus kann sie durch die Verwendung von Routinen zur Druckerkalibrierung, wie sie in Stopp et al. (2008) vorgestellt wurden, erhöht werden.

Zu den bei der Erstellung der Bauelemente zu berücksichtigenden konstruktiven Parametern zählt unter anderem die geeignete Ausführung der oben bereits erwähnten Bauteilschnittstellen. Durch diese, eine Raum sparende Konstruktion sowie die Verwendung von Offsets können Eigenkollisionen vermieden werden. Eine konstruktive Besonderheit, welche speziell durch die Verwendung von RP-Prozessen zur Verfügung steht, wäre die Möglichkeit der in Kapitel 5.2 vorgestellten Fertigung vollständiger Kinematiken in einem Arbeitsgang. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch der Aufbau der Prototypen aus einzelnen Teilelementen durchgeführt. Zwar ist so zusätzlich eine Montage erforderlich, jedoch sind eine höhere Genauigkeit und damit auch ein geringeres Lagerspiel erreichbar.

Nach der Fertigung der einzelnen RP-Grundelemente erfolgt die Montage der Baugruppen. Vorab werden hierzu die zu fügenden Teile der Baukastenelemente durch eine spanende Nachbearbeitung der Kontaktflächen aneinander angepasst. Diese Bearbeitung dient der Reduzierung der Rauigkeit der Oberflächen und damit der Verringerung der beispielsweise während der Bewegung von Führungen oder Drehgelenken auftretenden Reibung. Zusätzlich werden auch die Bauteilschnittstellen (Käfig/Bolzen) für die Zusammenführung mit weiteren Bauelementen vorbereitet und die Antriebseinheiten an die Gelenk- und Führungselemente angefügt. Hierzu werden die Antriebe (Servomotoren) sowie die Getriebeelemente (Servohebel etc.) mittels Schrauben fixiert, wobei für jede Baugröße der definierte Standardmotor verwendet wird. Speziell während der Montage der Servohebel der Antriebe muss darauf geachtet werden, dass diese in einer zur Winkelstellung des Antriebs korrekt zugeordneten Ausrichtung geschieht. Nur so kann sichergestellt werden, dass der Bewegungsbereich des Antriebs auch hinsichtlich der Mechanik (z. B. des Bewegungsbereichs des Schubkurbelgetriebes) abgestimmt ist. Andernfalls würden sich Ein-

schränkungen des Bewegungsbereichs sowie Eigenkollisionen der Antriebskinematik mit dem Grundelement des entsprechenden Gelenks ergeben.

Zum Ausgleich des durch Toleranzen auftretenden Spiels werden bei der Montage die oben bereits erwähnten Distanzscheiben verwendet. Hierdurch können ungewollte Relativbewegungen (z. B. Verkippen) der Bauteile (Kapitel 5.3.3) minimiert werden.

Wird nicht die on-demand Fertigung der entwickelten Kinematik, jedoch die Nutzung vorgefertigter Bauelemente angestrebt, hat eine geeignete Bereitstellung der Baukastenelemente für den Anwender zu erfolgen. So können die fertig montierten Baugruppen beispielsweise, wie in Abbildung 6.9 dargestellt, gemeinsam mit den für die Montage notwendigen Bauteilen (Zwischenplatten, Distanzscheiben, Schrauben etc.) verfügbar gemacht werden.



Abbildung 6.9: Bereitstellung der Hardwareelemente des vorgefertigten Mechanismenbaukastens mittlerer Baugröße: starre Elemente, Dreh- und Schubgelenke sowie zur Montage zusätzlich notwendige Kleinteile. Zusätzlich wird ein Basis-Element zur Montage der Kinematik sowie eine Spitze zur Darstellung des tool center point bereitgestellt.

Neben dem zur Befestigung des ersten Gliedes der kinematischen Kette verwendeten Sockel werden für den Aufbau und die realitätsnahe Darstellung der Kinematik sowie derer Funktionen zusätzlich Roboterwerkzeuge benötigt. Dies kann in Abhängigkeit vom Anwendungsfall eine einfache Spitze zur Festlegung des *tcp* der Kinematik, oder aber auch ein Greifer etc. sein. Beispielhaft wurden für Funktionstests ein Magnetgreifer sowie ein 2-Backengreifer angefertigt. Der Aufwand zum Betrieb der zwei Greifer wurde dabei bewusst sehr gering gehalten. So werden beide lediglich durch Anlegen einer 6 V- bis 12 V-Gleichspannung betrieben. Die Spitze zur Darstellung des *tcp* sowie die beispielhaft aufgebauten Greifen sind in Abbildung 6.10 abgebildet.



Abbildung 6.10: Beispielhaft gefertigte Werkzeuge für die RP-Kinematikprototypen: Spitze zur Darstellung des *tcp* sowie ein Magnet- und ein 2-Backengreifer.

## 6.2.2 Übergabe des Synthesergebnisses an den Anwender

Neben der Bereitstellung der Hardwareelemente werden dem Anwender des vorgestellten Systems zur Kinematikentwicklung zusätzliche Informationen über den entwickelten Mechanismus/Roboter übergeben. Diese umfassen, neben den für die Bewertung ausschlaggebenden geometrischen, kinetischen, kinematischen sowie einsatzspezifischen Daten, eine Fertigungs- und Montagehilfe sowie weitere visuelle Repräsentationen der Kinematik. Nachfolgend werden die Konzepte der Fertigungs- und Montagehilfe sowie die verfügbaren visuellen Darstellungen vorgestellt.

### Hilfestellung für die Prototypenfertigung und -montage

Die Art der für die Fertigung sowie für die Montage von Prototypen der entwickelten Systeme notwendigen Informationen, welche dem Anwender bereitgestellt werden müssen, hängt direkt von der Verwendung des Mechanismenbaukastens ab. Wurden für die Entwicklung der Kinematik bereits vorgefertigte Elemente verwendet, so muss dem Anwender die genaue Bauteilwahl aus dem materiellen Baukasten sowie die nötige Montageinformation (Montagereihenfolge, Montageausrichtung) zur Verfügung gestellt werden. Bei direkter, bedarfsabhängiger Fertigung der Bauelemente entfällt die Bauteilwahl. Jedoch müssen dem Anwender bei beiden Vorgehensweisen zusätzlich die nötigen Montageinformationen bereitgestellt werden. Hierzu hat jeweils eine Kennzeichnung der Kinematikmodule zu erfolgen. Dies erfolgt stets mittels eines Codes, welcher zur Vermeidung von Kollisionen als Taschen (Auspa-

rungen) auf den Bauteilen angebracht wird. So können in der montierten Kinematik direkt übereinander angeordnete Elemente trotz der Nummerierung problemlos gegeneinander bewegt werden.

Im Falle der bereits vorgefertigten Kinematikmodule wird ein Code, bestehend aus drei das Element beschreibenden Komponenten verwendet, welche im Folgenden aufgezeigt werden:

- Die erste Stelle beschreibt die Art des Elements. Hierbei wird zwischen prismatischen Führungen (*prismatic*), rotatorischen Gelenken (*rotatory*) sowie starren Elementen (*stationary*) unterschieden, welche mit *P*, *R* sowie *S* bezeichnet werden.
- Anhand der zweiten Stelle wird die Länge des betreffenden Elements, welche in Abhängigkeit von der verwendeten Reihe festgelegt wird, gekennzeichnet. Hierbei kann bei der oben verwendeten sechsten Reihe aus den Längen 2, 3, 5 und 7 ausgewählt werden.
- Weiterhin erfolgt durch die dritte Stelle eine Angabe der verwendeten Baugröße der Elemente, wofür die oben bereits festgelegten Kennzeichnungen *s*, *m* sowie *l* (*small*, *medium*, *large*) verwendet werden.

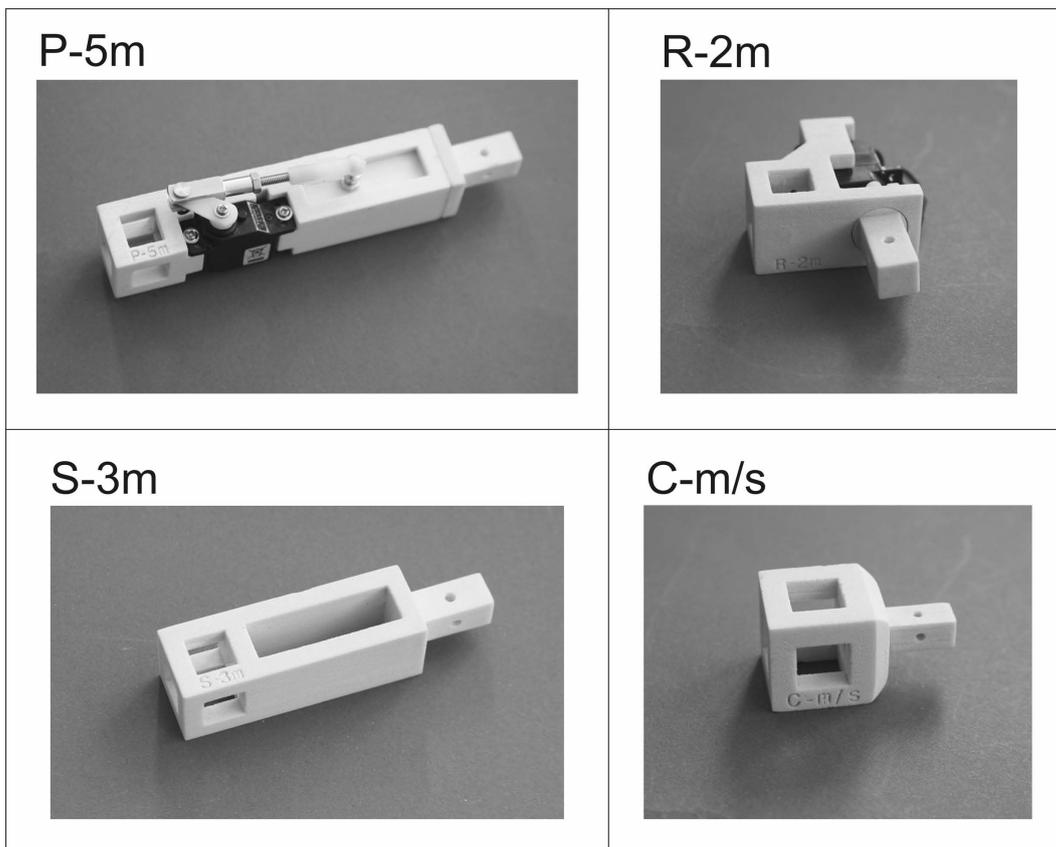


Abbildung 6.11: Darstellung dreier Derivate der Hauptelementgruppen (starres Element, Drehgelenk, prismatische Führung) sowie eines Verbindungselements. Alle Elemente sind mit den für die Bauelementauswahl und -montage erforderlichen Kennzeichnungen versehen.

Ein starres Element der Länge 5 der mittleren Baugröße besitzt somit die Kennzeichnung  $S5-m$ . Weitere Bezeichnungen der Elemente sowie deren Kennzeichnung werden in Abbildung 6.11 beispielhaft aufgezeigt. Dabei wird auch ein Verbindungselement mit der Bezeichnung  $C$  (*connector*) zur Verbindung von Elementen unterschiedlicher Baugrößen (hier zwischen Baugröße  $m$  und  $s$ ) dargestellt. Die neben den fallspezifisch verwendeten Elementen, zusätzlichen Bauteile wie der Sockel oder das Werkzeug des Roboters, werden mit *base* bzw. *tcp* bezeichnet.

Durch die Kennzeichnung der Elemente ist nun deren situationsabhängige Auswahl möglich. Diese, sowie die Reihenfolge der Montage und die dabei auftretenden Orientierungen der Bauelemente, müssen dem Anwender angezeigt werden. Für diese, aktuell noch nicht realisierte Funktion, soll die Kinematik zukünftig in Form einer Explosionszeichnung oder auch einer abgerollten Darstellung der Bauelemente, analog zum Netz eines Würfels, dargestellt werden. Ein mögliches Beispiel hierfür ist in Abbildung 6.12 aufgezeigt. Die Darstellung enthält die einzelnen Bauteile der Kinematik in versetzter Anordnung sowie die zugehörige Kennzeichnung der Montagereihenfolge. Diese ist zum einen durch den Buchstabencode im Schriftfeld ( $BP_5R_2S_3$ ), zum anderen durch die Abwicklung der Kinematik verdeutlicht. So folgen hier auf das *base*-Element das prismatische Element der Länge 5, das rotatorische Element der Länge 2, sowie das starre Element der Länge 3.

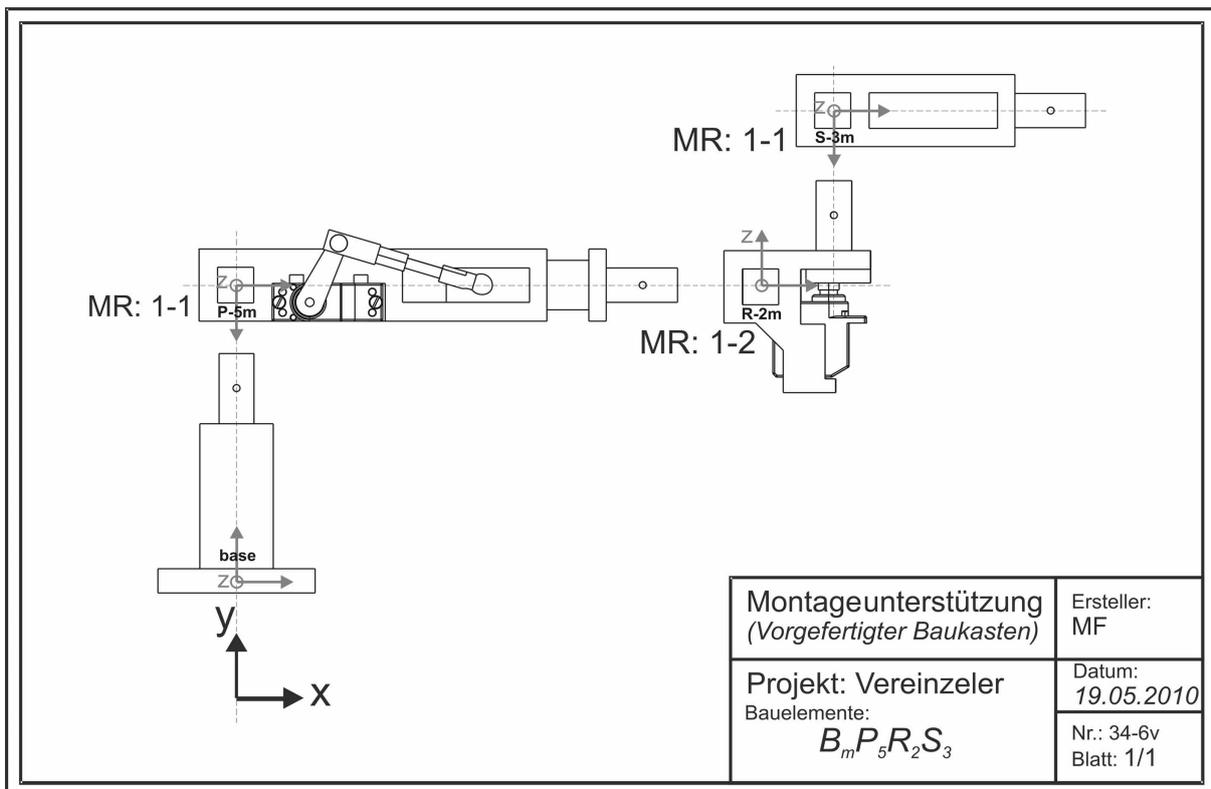


Abbildung 6.12: Explosionszeichnung zur Unterstützung der Montage des mittels des vorgefertigten Baukastens entwickelten Roboters: Angabe der Bauelementauswahl, der Montagereihenfolge sowie der spezifischen Bauteilausrichtung.

Eine weitere, direkt dem Bauteil zu entnehmende Information, bietet die Platzierung der Kennzeichnung. So legt die Position der Kennzeichnung auf dem Bauteil eindeu-

tig das näher am Beginn der kinematischen Kette, der Montagestelle *base* des Roboters, gelegene Ende des Bauteils fest. Die Gegenseite ist stets näher dem tool center point (*tcp*) anzuordnen.

Neben der Elementanordnung und der generellen Montagerichtung zwischen *base* und *tcp* muss dem Anwender zur Vermeidung von Kollisionen während des späteren Betriebs zusätzlich eine der zwanzig möglichen spezifischen Ausrichtungen der Bauelemente angezeigt werden. Hierfür wird jeweils die Position der eindeutig platzierten Kennzeichnung des Bauelements relativ zur Kennzeichnung des vorherigen Bauelements beschrieben. Die Konvention zur Bezeichnung der Ausrichtung ist Abbildung 6.13 zu entnehmen. Dabei wird zunächst die Position der beschrifteten Seite des Montagekäfigs relativ zur beschrifteten Seite des vorangehenden Bauteils festgelegt. Hierbei ergeben sich sechs Möglichkeiten, welche durch die Ziffern 1-6 gekennzeichnet sind. Weiterhin werden die möglichen Ausrichtungen des Bauteils mit dieser Beschriftungsseite, ausgehend von der, der beschrifteten Seite des vorangehenden Elements nächsten Position, beschrieben. Hierbei erfolgt eine Nummerierung im Uhrzeigersinn. So ergeben sich bei vertikal liegender Beschriftung jeweils drei, bei horizontal liegender Beschriftung jeweils vier Möglichkeiten. Diese werden anhand der Punkte dargestellt. So stellt ein Punkt die Ausrichtung „1“ auf der entsprechenden Seite dar, zwei Punkte bezeichnen die Ausrichtung „2“, etc. Die Kennzeichnung der Montagerichtung *MR* des zweiten Elements in Abbildung 6.12 ist beispielsweise durch die Bezeichnung *MR:1-1* angegeben. Dies bedeutet, die Kennzeichnung des Folgeelements befindet sich auf derselben Seite wie die des vorangehenden Elements an Position „1“.

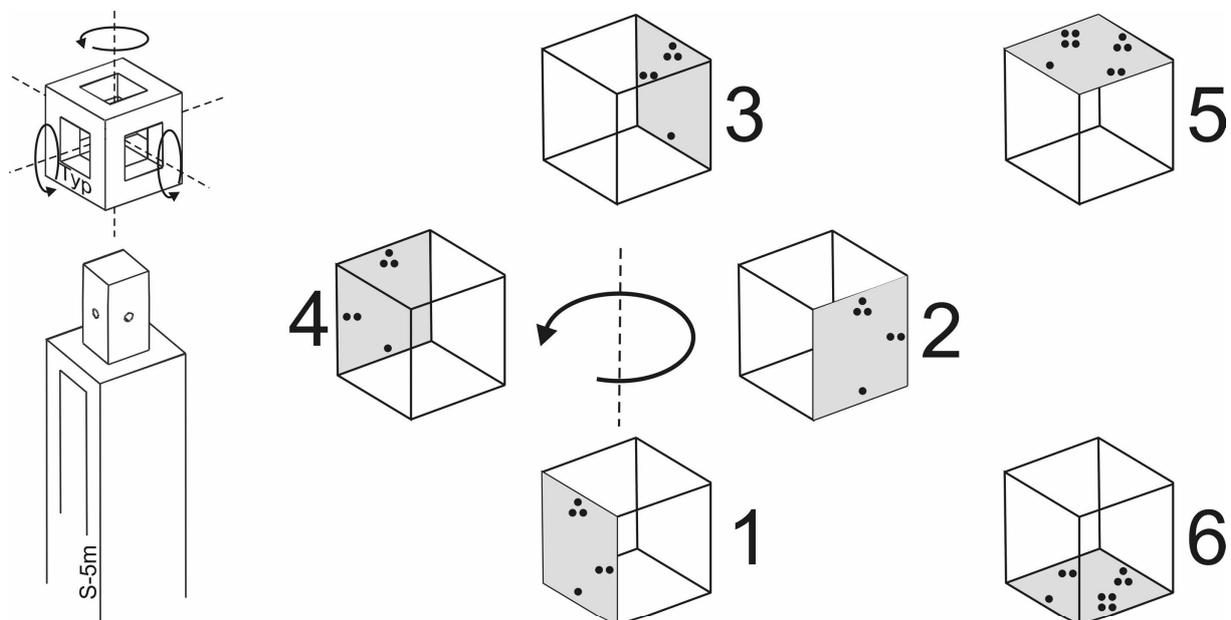


Abbildung 6.13: Konvention zur Darstellung der spezifischen Montageausrichtung *MR* der Bauelemente. Die hinterlegte Fläche gibt jeweils die Position der beschrifteten Fläche (1-6) an. Die Punktgruppen zeigen die jeweils möglichen Orientierungen (1-3 bzw. 1-4) an.

Werden die Bauteile der Kinematik aus bedarfsgesteuert erzeugten STL-Daten gefertigt, kann neben der obigen auch eine vereinfachte Kennzeichnung verwendet werden. Diese zeigt dann die Montagereihenfolge und wird zusätzlich zur Beschreibung der Ausrichtung der Bauteile verwendet. Jedes einzelne Element wird dafür mittels zwei Ziffern in aufsteigender Reihenfolge gekennzeichnet. Dabei stellt der Sockel die Basis der Kinematik dar, welcher an der Verbindung zur Montagefläche des Bauraums mit der Nummer „0“ gekennzeichnet wird. Auf der Gegenseite, der Verbindung zum ersten Glied der Kinematik, wird eine „1“ angebracht. Das dem Sockel nächste Element besitzt auf der mit diesem zu verbindenden Seite ebenfalls die Nummer „1“. Auf der gegenüber liegenden Seite, der Verbindung zum Folgeelement, wird es mit der Nummer „2“ gekennzeichnet. Die folgenden Glieder der Kinematik sind analog in aufsteigender Reihenfolge bis zum letzten Element, dem *tcp*, gekennzeichnet. Auch in diesem Fall wird als Montagehilfe eine Explosionszeichnung der Kinematik ausgegeben (Abbildung 6.14).

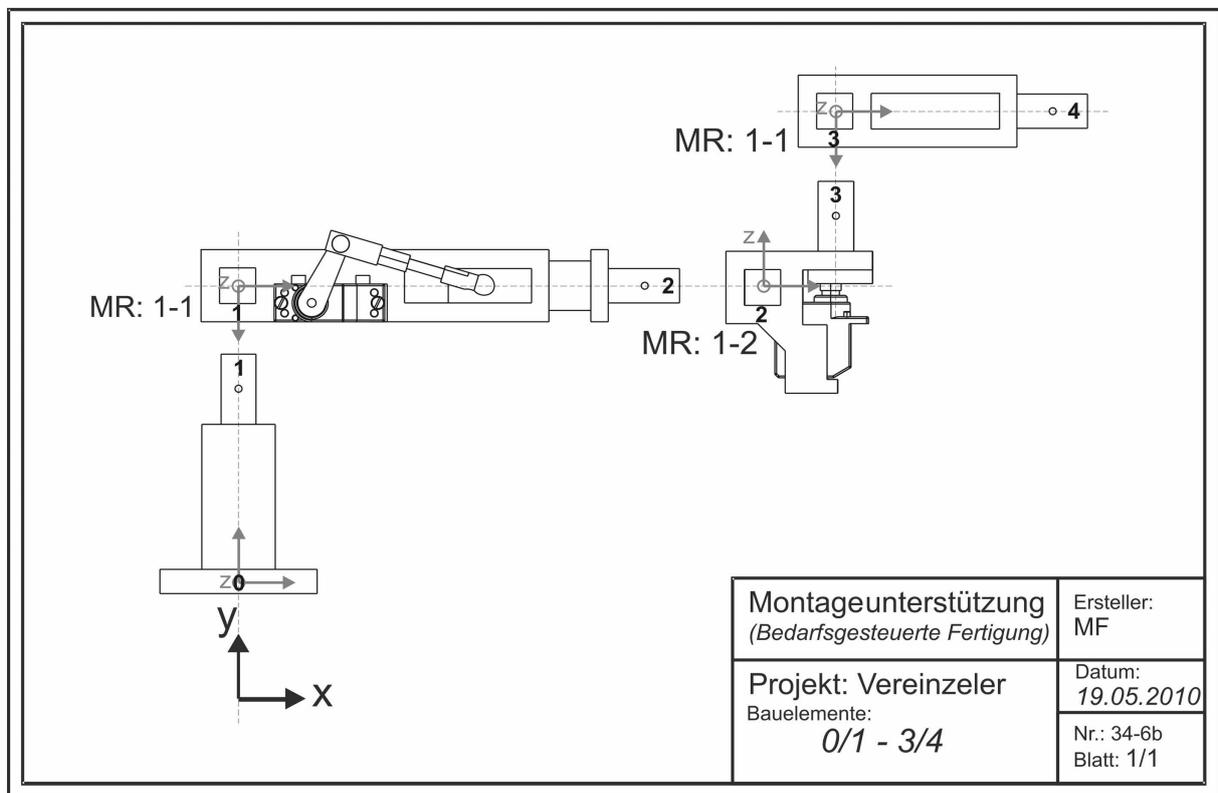


Abbildung 6.14: Darstellung der Zusammenbaureihenfolge und -ausrichtung bei bedarfsgesteuerter Fertigung von Bauelementen anhand einer Explosionszeichnung.

Die Kennzeichnung der Ausrichtung der Bauteile während der Montage wird analog zum Vorgehen bei bereits vorgefertigten Bauelementen durchgeführt.

Bestehen Bauelemente aus mehreren Komponenten, müssen speziell bei bedarfsgesteuerter Erzeugung weitere Informationen über deren Vormontage an den Anwender übergeben werden. Die Nummerierung der Reihenfolge, welche die Bauelemente bereits besitzen, kann aufgrund der maximalen Anzahl von zwei RP-Komponenten je Element problemlos zugleich für die Vormontage verwendet wer-

den. Dabei ist darauf zu achten, dass die zwei aufsteigenden Zahlenmarkierungen jeweils auf dieselbe Seite des Bauteils zu setzen sind. Die Anbringung der weiteren Komponenten wie der Antriebe sowie der möglichen Gelenkgetriebe geschieht bei jedem Element einer Baugruppe gleich. Daher könnte jeweils eine separate Zusammenbauanleitung je Bauteilart zur Verfügung gestellt werden.

Die während der Montage notwendige Verschraubung der Zwischenplatte zur Verbindung zweier Kinematikelemente kann als trivial angesehen werden und bedarf daher keiner weiteren Anleitung.

### Digitale Ergebnisvisualisierung und mögliche Verwendung

Um bereits vor der Erstellung der Prototypen räumliche Informationen über das entwickelte System zu erhalten, werden neben den Hardware-Ausgaben zusätzliche digitale, räumliche Darstellungen verwendet. Diese sind zunächst anhand einer direkten Ausgabe in der Entwicklungsumgebung realisiert. Dabei kann sowohl der Aufbau des Systems als auch dessen Bewegung simuliert werden. Die Bauelemente werden hierfür jedoch nicht anhand vollständiger Geometriemodelle beschrieben. Sie werden zur Realisierung einer rationellen Verarbeitung vereinfacht anhand ihrer Längsachsen oder auch als Flächenmodelle dargestellt. Abbildung 6.15 zeigt dies anhand einer dreigliedrigen kinematischen Kette, bestehend aus zwei rotatorischen Gelenken sowie einem Schubgelenk.

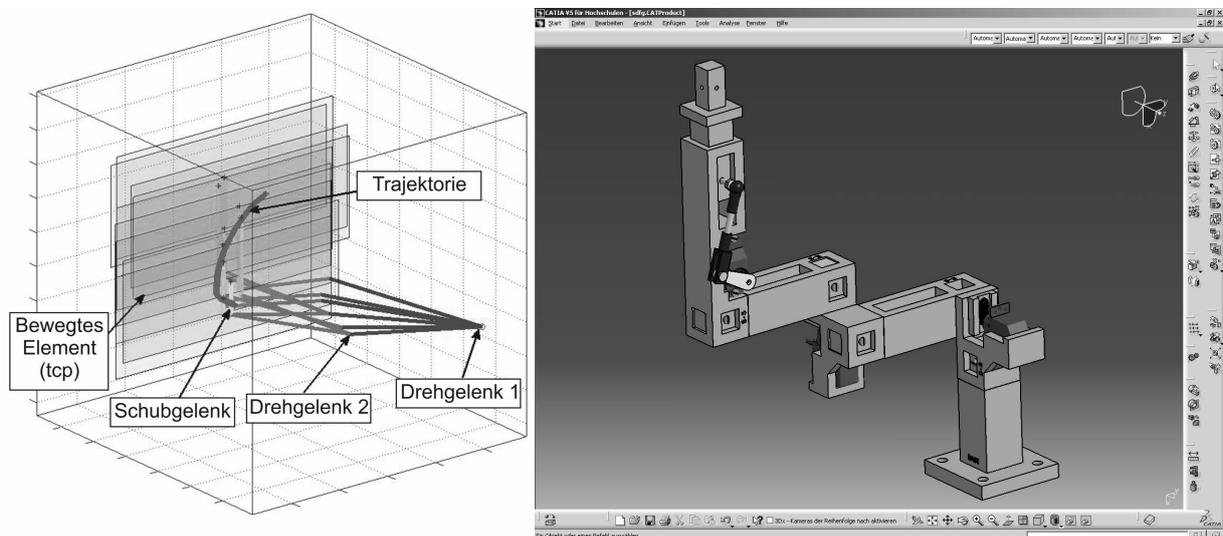


Abbildung 6.15: Simulation der Bewegung eines entwickelten 3-DOF-Roboters im Kinematikentwicklungssystem, implementiert in Matlab<sup>®</sup> (The MathWorks<sup>™</sup>), sowie Darstellung der Geometrie eines weiteren dreigliedrigen Mechanismus in einer CAD-Umgebung (CATIA V5, Dassault Systèmes).

Darüber hinaus kommen die für die RP-Fertigung ausgeleiteten STL-Daten bei der digitalen Darstellung ein weiteres Mal zur Anwendung. Mittels bereits vorhandener Import-Schnittstellen von CAD-Umgebungen (z. B. CATIA V5, Dassault Systèmes) können sie in diese importiert werden. Dort bilden sie daraufhin eine räumliche Dar-

stellung der real gefertigten Bauelemente. In Abbildung 6.15 wird dies anhand der Darstellung einer dreigliedrigen kinematischen Kette aufgezeigt. Da die STL-Daten lediglich Flächen-, nicht aber Volumenmodelle darstellen, können sie unmittelbar nur bildhaft angezeigt werden. Für eine weitere Bearbeitung hätte zunächst eine Überführung der Daten in Volumenmodelle zu erfolgen. Mittels dieser könnten in aktuell verfügbaren Konstruktionsumgebungen dann beispielsweise Bewegungssimulationen durchgeführt werden.

## **6.3 Aktuierung der Prototypen**

Um möglichst direkt Rückmeldung über die Funktionalität eines entwickelten robotischen Systems zu erhalten ist nicht nur dessen grafische bzw. dessen statische, materielle Ausgabe notwendig. Denn gerade im Bereich der Robotik ist der Nutzen der verwendeten Systeme stark von deren realisierbarer Dynamik und damit auch deren Ansteuerung abhängig. Daher wurde eine, im Sinne des in der vorliegenden Arbeit angewendeten Rapid Prototyping, möglichst einfache und intuitiv bedienbare Möglichkeit zur Aktuierung der Roboterprototypen geschaffen. Diese gewährleistet eine gute Darstellung der Funktion der Prototypen gegenüber den Anwendern. Teile des dabei verwendeten System-Setups wurden bereits in Fischer et al. (2010) vorgestellt.

### **6.3.1 Grundsätzliches zur Ansteuerung der Prototypen**

Für die Aktuierung der Prototypen wird im vorliegenden System ein eigenständiges Steuerungssystem verwendet. Auf dieses wird die für die Bewegung notwendige Information vom Entwicklungsrechner übertragen. Das Abfahren der Bewegung mittels des Steuerungssystems bietet vor allem gegenüber Systemen mit Online-Kommunikation Vorteile im Hinblick auf den geringeren Aufwand der Systemkommunikation sowie die Unabhängigkeit in Bezug auf die realisierbare Übertragungsgeschwindigkeit der Entwicklungsrechnerkommunikation. Hierdurch wird eine Steuerung geringerer Komplexität ermöglicht. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der räumlichen Trennung des Entwicklungsrechners sowie des durchgeführten Tests des Systems. So ist durch die separate Ansteuerungsmöglichkeit der Test eines eigenständigen, unabhängigen Systems „im Feld“, wie beispielsweise in der Produktion, im OP oder auch in einer Versuchsumgebung möglich. Nachteilig kann sich dabei jedoch die geringere Leistungsfähigkeit des Mikrocontrollers während der durchgeführten Berechnungen auswirken. Daher muss sichergestellt werden, dass trotz der notwendigen Berechnungen sowie der Übertragung der Ansteuerinformation an die Antriebe die realisierbare Taktzeit zum Triggern der Antriebe ausreichend gering ist. Nur so kann eine flüssige Bewegung des Prototyps gewährleistet werden. Unter Berücksichtigung des Abtasttheorems nach Nyquist-Shannon (Wendt & Lutz, 2007) muss daher die Taktzeit kleiner als die Hälfte der für die Bewegung zwischen zwei benachbarten Frames notwendigen Zeit sein. Weiterhin muss aber auch die Dynamik des Antriebs, abhängig von der maximalen Winkelgeschwindigkeit sowie der -beschleunigung, ausreichend groß sein. Nur so können die gewünschten Bewegungen korrekt abgebildet werden.

An dieser Stelle ist auch die Art der durchgeführten Bahnplanung interessant. Diese kann allgemein, in Abhängigkeit von ihrer Ausführung, einige Zeit in Anspruch nehmen. Im vorliegenden Fall konnte jedoch aufgrund des Syntheseverfahrens zur Ermittlung der geometrischen Abmessungen des Mechanismus auf eine separate Bahnplanung sowie die Durchführung einer online-Pfadplanung verzichtet werden. Die benötigten Ansteuerungsdaten zum Abfahren der Trajektorie ergeben sich direkt aus der Synthese. Diese können jedoch vor der Übertragung an das Steuergerät zusätzlich durch Ausfiltern von Sprüngen geglättet werden. Dies verbessert die Ansteuerung des Mechanismus, welche so gleichmäßiger und damit in der späteren Anwendung energieeffizienter und verschleißärmer durchgeführt werden kann.

### 6.3.2 Realisierung der Ansteuerung

Zur Durchführung der offline-Ansteuerung wurden alle notwendigen Hardware-Komponenten in einer Steuerbox zusammengefasst. Diese wird zum einen mit dem Entwicklungsrechner, zum anderen mit dem Prototyp der Kinematik verbunden. Ihre Programmierung erfolgt über die USB-Schnittstelle des Rechners sowie ein Programmiergerät. Zur Energieversorgung des Mikrocontrollers sowie der Antriebe des Prototyps ist zusätzlich eine externe Stromversorgung angeschlossen (Abbildung 4.12).

Um flexibel Roboterprototypen aufbauen zu können, muss die Steuerbox (Abbildung 6.16) den Anschluss einer möglichst großen Antriebsanzahl gewährleisten. Für die Realisierung räumlicher Bewegungen sind dabei minimal drei Antriebe erforderlich. Daher wurde dies beim vorliegenden System beispielhaft durch die Anschlussmöglichkeiten für drei Antriebe realisiert.



Abbildung 6.16: Steuerbox zur Bedienung der entwickelten Kinematiken: Der Funktionsumfang umfasst neben den Benutzerschnittstellen zum Start/Stopp der Bewegungsdurchführung zusätzliche Anzeigenmöglichkeiten zur Darstellung der Systemzustände.

Die Steuerbox verfügt über die in Kapitel 4.2.2 bereits genannten Benutzerschnittstellen zu deren Bedienung sowie zur Anzeige des Systemzustandes. Letztere geben Auskunft über die Anzahl der für das aktuell auf dem Mikrocontroller geladene Programm anzuschließenden Antriebe, die aktuell abzufahrende Bewegungsrichtung (vorwärts/rückwärts) sowie weitere Systemzustände wie den Programmiermodus oder den Notaus-Zustand.

Der Steuerungscode ist modular, aus Elementen zur Definition der Bewegungsbahn sowie solchen zur Abstimmung auf die verwendeten Antriebe, aufgebaut. Beispielfähig wurde er für die Verwendung der oben genannten Servoantriebe aus dem Bereich des Modellbaus implementiert. Diese benötigen, aufgrund der bereits integrierten Motorregelung, neben der Versorgungsspannung zusätzlich ein PWM-Signal. Dieses gibt die jeweilig gewünschte Winkellage vor. In dem Programmmodul zur Abstimmung auf die Modellbau-Servoantriebe sind neben der Erstellung des PWM-Signals weitere einzustellende Parameter der Antriebe (z. B. Wertebereich und Auflösung der Positionsmessung etc.) hinterlegt. Diese können vom Anwender direkt definiert und verändert werden. Damit kann die Ansteuerung auf einen spezifischen Motor abgestimmt werden. Zur Ansteuerung der verwendeten Antriebe wurden ein TTL-Signal mit einer Spannung von 5 V sowie eine Updatefrequenz von 25 Hz bei einer Pulsweite von 1-2 ms definiert.

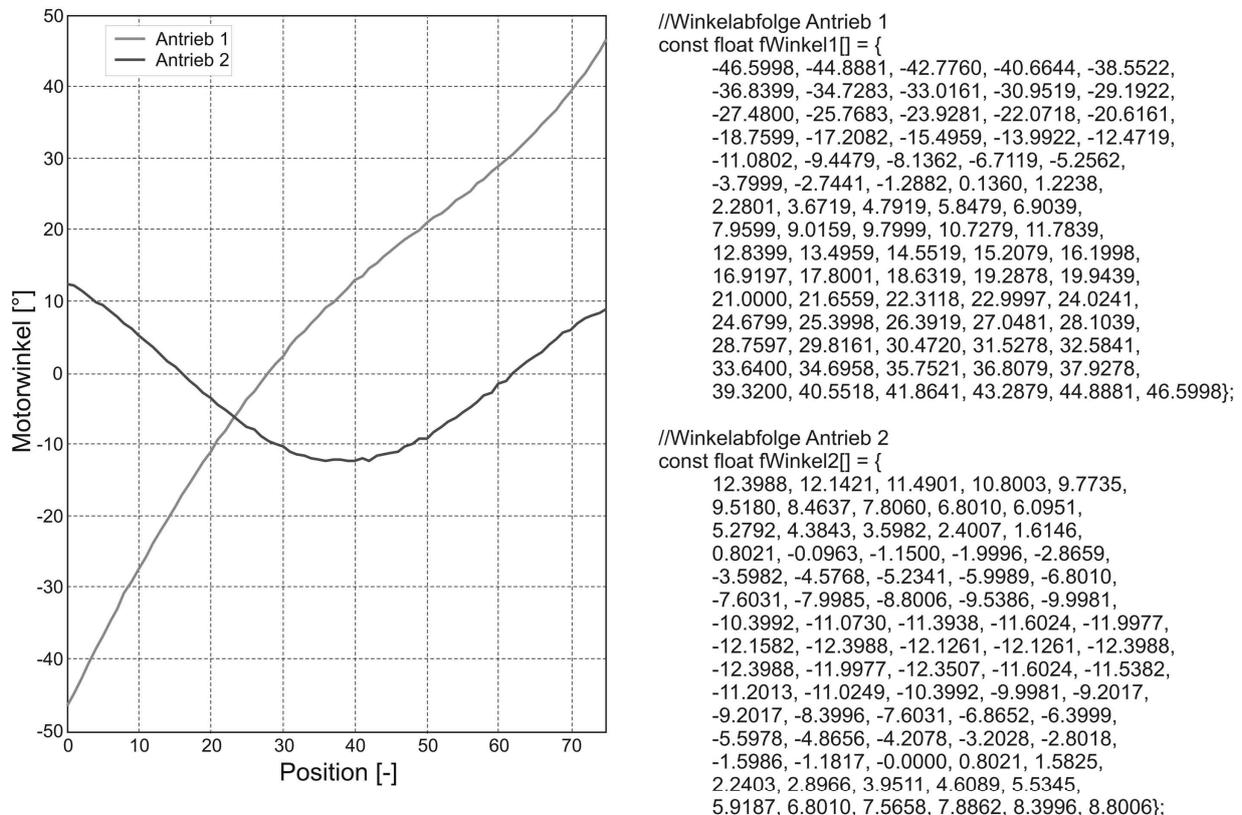


Abbildung 6.17: Möglicher Verlauf der an die Steuerbox übergebenen Gelenkwinkel zur Ansteuerung zweier Antriebe einer Kinematik in graphischer Darstellung sowie in der an den Mikrocontroller übergebenen Form.

Zur Verwendung weiterer Antriebsarten (z. B. Schrittmotoren) muss dem Steuerungscode lediglich ein weiteres, derartiges Modul hinzugefügt werden.

Ausgehend von den gewünschten Winkelstellungen der Antriebe werden die hierfür benötigten Pulse berechnet. Dabei werden die Winkelstellungen selbst direkt aus der Syntheseoberfläche mittels einer durch den Mikrocontroller verarbeitbaren Datei übergeben. Diese beinhaltet für jeden Antrieb eine Abfolge des Betrags der Winkelstellungen. Abbildung 6.17 zeigt grafisch sowie in Form einer Liste eine mögliche Abfolge der notwendigen Winkelwerte der Antriebe einer zweigliedrigen Kinematik. Die aus den Winkelstellungen resultierenden Spannungssignale werden von der Steuerbox an die Antriebe übergeben.

### 6.3.3 Der Prototyp in der Versuchsumgebung

Nach der Übergabe der Parameter der Trajektorie an die Steuerbox kann das entwickelte System mit deren Hilfe bewegt werden. Hierfür kann der Prototyp in die geplante Zielumgebung integriert werden. Ist dies nicht möglich, kann das entwickelte System oder dessen Modell zur Veranschaulichung der räumlichen Abmessungen und Verhältnisse in eine hierfür aufgebaute Versuchsumgebung eingebracht werden. Diese verfügt zur verbesserten Einschätzbarkeit der Systemabmessungen über ein Raster, welches in seiner Größe der Standard-Bauelementgröße der mittleren Reihe des Roboterbaukastens entspricht. In die Versuchsumgebung können neben dem entwickelten System auch Modelle möglicher, im späteren realen Bau- sowie im Arbeitsraum befindlicher Hindernisse eingefügt werden. Genügt hierbei deren grobe Abbildung, kann dies mit Hilfe zur Verfügung stehender Standardwürfel geschehen. Diese sind in unterschiedlichen Vielfachen der mittleren Standard-Bauelementgröße zur Verfügung gestellt. Abbildung 6.18 zeigt beispielhaft einen auf einem Sockel befestigten 3-DOF-Prototyp einer RP-Kinematik in der Versuchsumgebung. Der Prototyp besteht aus einem axialen sowie zwei gewinkelten Drehgelenken, welche in dieser Reihenfolge seriell, zum Teil über starre Elemente, miteinander verbunden sind. Zur Darstellung des *tcp* wurde eine Spitze am letzten Glied der kinematischen Kette befestigt. Weiterhin wurden zusätzlich grobe Modelle von Hindernissen bzw. den anzusteuern den Ablagepositionen in den durch die Versuchsumgebung dargestellten Bau- und Arbeitsraum eingebracht.

Der vorgestellte Aufbau bietet eine Möglichkeit zur zeitnahen sowie anschaulichen Darstellung der Funktionalitäten des entwickelten Prototyps. Hierdurch kann das Ergebnis der durch Prototypen unterstützten, anwendungsspezifischen Kinematikentwicklung überprüft werden. Dies gilt sowohl hinsichtlich der entwickelten Kinematik als auch der während der Synthese definierten Ansteuerung. Durch das Einbringen der Hindernisse zur Beschränkung des Arbeitsraumes sowie die Möglichkeit zur Einbringung von Beschränkungen des Bauraumes kann das System zugleich hinsichtlich der vorgegebenen Randbedingungen überprüft werden.

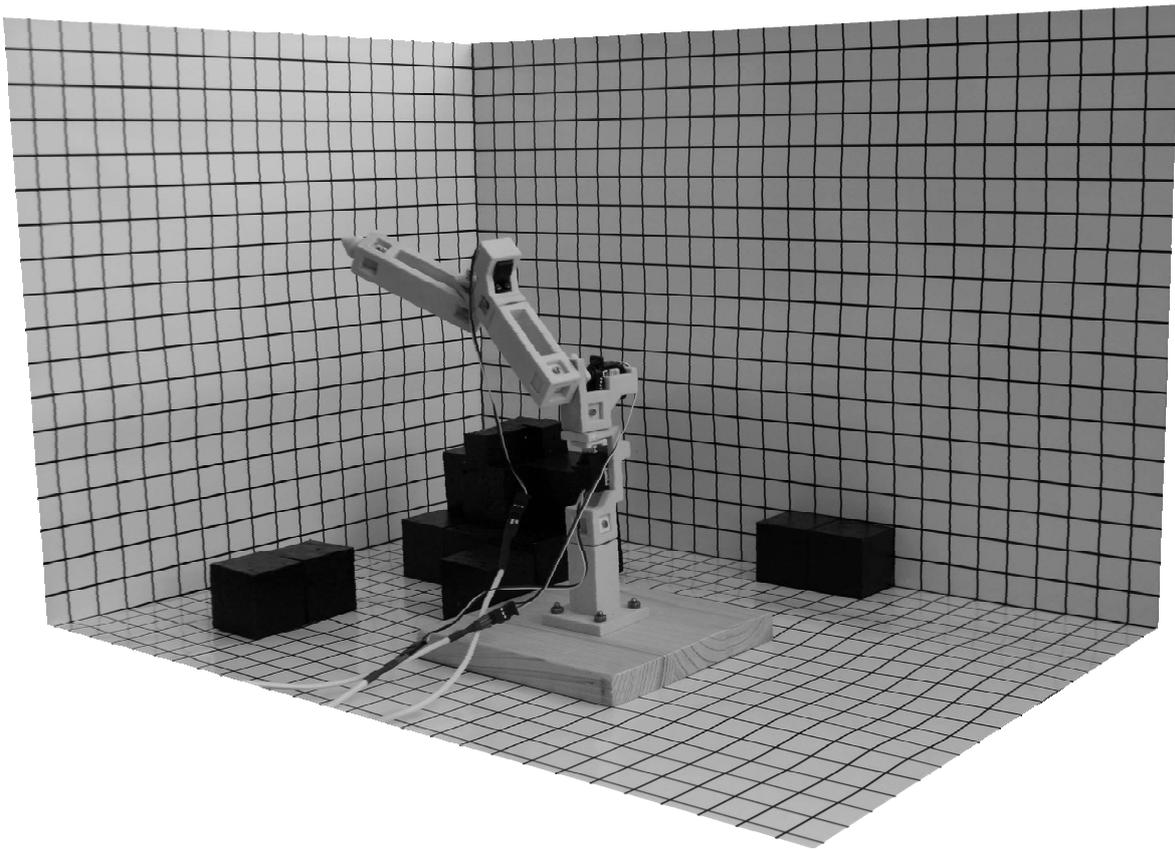


Abbildung 6.18: Prototyp einer 3-DOF-Kinematik in der Versuchsumgebung bei gleichzeitiger Darstellung von Hindernissen sowie Ablagepositionen im Bau- und Arbeitsraum. Mittels der Steuerbox kann hierin die Bewegung des Roboters dargestellt werden.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Systementwurf zur Unterstützung der Entwicklung serieller Kinematiken sowie deren direkte Realisierung anhand von Prototypen vorgestellt. Das System, welches die Durchführung einer anwendungsspezifischen Entwicklung ermöglicht, besteht aus mehreren Teilbereichen, von welchen ausgewählte beispielhaft realisiert und angewendet wurden. Zunächst wurden Möglichkeiten zur Berücksichtigung der vom aktuell betrachteten Zielsystem vorgegebenen Randbedingungen implementiert. Hierzu zählt unter anderem die Definition der verfügbaren Bau- und Arbeitsräume. Der darauf folgende Entwicklungsprozess wird durch die Verwendung eines modularen Mechanismenbaukastens unterstützt. Er dient sowohl zur Hinterlegung der Eigenschaften der aktuell verwendeten Kinematik als auch zu deren Veranschaulichung für den Entwickler. Diese erfolgt sowohl rechnerisch als auch durch die zeitnahe Anfertigung von Hardware-Prototypen mittels Rapid-Prototyping-Verfahren. Neben der materiellen Darstellung der Struktur des entwickelten Systems wird so auch der Grundstein für die Darstellung dessen Funktionalität gelegt. Diese wird durch eine Mikrocontroller-basierte Aktuierung der neu entwickelten Kinematik erreicht. Die Arbeit zeigt zunächst den Aufbau und die Funktionsweise des Gesamtsystems. Daraufhin wird auf die Ausgestaltung des Mechanismenbaukastens, die beispielhafte Realisierung ausgewählter Teilelemente des Entwicklungssystems sowie die Prototypenausgabe näher eingegangen.

Der entwickelte, multikriterielle Mechanismenbaukasten bildet die Grundlage zur Unterstützung des gesamten Entwicklungsvorgehens. Er beinhaltet modulare kinematische Grundelemente wie Gelenk- und Verbindungselemente in parametrierter Form, von welchen während der Entwicklung einer Kinematik Derivate abgeleitet werden können. Diese individuell angepassten Bauelemente unterscheiden sich dann hinsichtlich ihrer Eigenschaften, wie beispielsweise der Dimensionen. Die Eigenschaften und Parameter der Bauelemente werden in jeweils sieben Repräsentationen hinterlegt, anhand derer während der Synthese auch eine Variation des Gesamtsystems durchgeführt werden kann. Die Repräsentationen umfassen jeweils ein mathematisches Modell des Bauelements, zum Beispiel des Dreh- oder Schubgelenks, welches die möglichen Bewegungen des Elements beschreibt. Die ebenfalls enthaltenen geometrischen Modelle sowie die Bounding-Box-Modelle beinhalten die Hauptabmessungen der Elemente sowie deren Bounding-Boxes zur Realisierung einer Kollisionserkennung. Mittels parametrierter STL-Modelle wurde zusätzlich eine flexible Schnittstelle zur Prototypenfertigung geschaffen. Darüber hinaus sind die Eigenschaften der verwendeten Antriebe sowie die kinetischen Eigenschaften der Elemente anhand derer Massenträgheitsmomente in weiteren Repräsentationen enthalten. Durch die Bereitstellung einer Möglichkeit zur Referenzierung der Elemente ist eine spätere Durchgängigkeit des Baukastens sicher gestellt, wodurch in Verbindung mit den Schnittstellen zu den anderen Komponenten des Entwicklungssystems ein durchgängiger Gesamtentwicklungsprozess gewährleistet wird.

Zur erweiterten Abstimmung der entwickelten Kinematik auf das Zielsystem wurden Teilmodule zur Berücksichtigung der im Einzelfall relevanten Randbedingungen, zur simultanen Kinematik- und Ansteuerungsentwicklung sowie zur Bewertung entwickelter Konzepte hinsichtlich individueller Kriterien definiert. Beispielhaft wurden zwei Möglichkeiten zur Definition der für die Integration von Systemelementen verfügbaren 2D-Bauräume sowie der für deren Bewegungen vorhandenen Arbeitsräume implementiert. Diese können in Abhängigkeit vom Fortschritt der Entwicklung und dem bereits vorhandenen Kenntnisstand angewendet werden. So wurde für die Bauraumdefinition in frühen Phasen der Produktentwicklung eine Möglichkeit unter Verwendung manueller Konzeptskizzen implementiert. Für spätere Entwicklungsphasen wurde die Verwendung von 3D-Geometriedaten im STL-Format ermöglicht. Die Durchführung der Synthese und Bewertung unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen bewirkt eine frühzeitige Anpassung der entwickelten Kinematik an das Zielsystem. Diese wird zusätzlich durch die gleichzeitige Entwicklung der Steuerung unterstützt, wodurch eine ganzheitliche Anpassung der Systeme erreicht werden kann.

Um eine frühzeitige und produktnahe Ausgabe des Entwicklungsergebnisses zu erzielen, wurde der Einsatz des Mechanismenbaukastens in Verbindung mit Rapid-Prototyping-Prozessen vorgestellt. Nur so können die Ergebnisse dem Anwender angemessen kommuniziert und somit ein Systemverständnis aufgebaut werden. Hierdurch kann, gegenüber bislang verfügbaren Ausgabemöglichkeiten wie reinen CAD-Verknüpfungen oder Simulationen, die Effizienz der Kinematikentwicklung gesteigert werden. Die notwendige Datenschnittstelle bilden die parametrisierten STL-Repräsentationen der Bauelemente des Mechanismenbaukastens. Diese werden bezüglich des verwendeten Fertigungsverfahrens angepasst und können somit direkt mit der Rapid-Prototyping-Anlage in Prototypenelemente umgesetzt werden. Da die einzelnen Module meist aus mehreren Bauteilen bestehen, wurden für deren effiziente und fehlerfreie Montage nach der Fertigung den Anwender unterstützende Bau- und Montagehilfen vorgestellt. Diese enthalten jeweils eine Explosionszeichnung der Kinematik und geben Auskunft über die benötigten Bauelemente, deren Montagereihenfolge sowie -orientierung. Mittels der Prototypen können die Bewegungen, die Erreichbarkeiten sowie die Arbeitsräume der entwickelten Kinematiken zeitnah und kostengünstig dargestellt werden. Hierdurch können eine Eigenschaftsfrüherkennung durchgeführt und damit Fehler während der Entwicklung frühzeitig erkannt werden. Dies ermöglicht wenn notwendig, ein regulierendes Eingreifen in frühen Phasen der Kinematikentwicklung, wodurch dieses gezielter, schneller sowie kosteneffizienter durchgeführt werden kann.

Zur hardwarenahen Überprüfung der Funktionen und Eigenschaften der entwickelten Systeme, welche stark von deren durchgeführter Bewegung abhängen, wurde weiterhin eine Möglichkeit zur zeitnahen Aktuierung der erstellten RP-Prototypen entwickelt. Hierfür werden die erforderlichen Ansteuerungsdaten des entwickelten Systems in Form der Gelenkwinkel sowie weiterer, individueller Steuerparameter der integrierten Antriebe aus der Entwicklungsumgebung exportiert. Dies geschieht in

Form von Teilen eines Programmcodes, welcher mit Hilfe eines Mikrocontrollers verarbeitet werden kann. Der Mikrocontroller, mit welchem daraufhin die Antriebe angesteuert werden können, ist dafür in eine Steuerbox integriert. Diese bietet zusätzlich auch Benutzerschnittstellen. Hierüber wird die entwickelte Kinematik daraufhin entweder in der originalen Zielumgebung, oder aber auch in einer Modellumgebung mit beispielhafter Darstellung von Hindernissen etc. betrieben.

Der beschriebene Inhalt der vorliegenden Arbeit stellt eine Grundlage für zahlreiche zukünftige Weiterentwicklungen dar. Diese könnten unter Anderem folgende Bereiche umfassen:

- **Durchführung der Prototypenausgabe mittels genauerer RP-Verfahren:**  
In der vorliegenden Arbeit wurde die Anfertigung von Prototypen mit Hilfe des RP-Verfahrens 3D-Druck realisiert. Dieses stellt ein einfach anzuwendendes Verfahren dar, dessen Genauigkeit jedoch begrenzt ist. Im weiteren Vorgehen könnte daher die Prototypenausgabe zur Erhöhung der Genauigkeit der Modelle an die Verwendung exakterer Verfahren, wie beispielsweise die Stereolithographie (STL) angepasst werden. Darüber hinaus könnten ebenso Negativmodelle der verwendeten Bauelemente mittels der RP-Verfahren angefertigt werden, mit welchen dann eine Fertigung von Bauelementen mit verbesserten Gleiteigenschaften oder verringertem Gewicht durch zum Beispiel Kunststoff-Vakuumguss möglich wäre.
- **Verwendung stabilerer Materialien für die Prototypenausgabe:**  
Die oben beschriebenen, angefertigten Modelle der Kinematiken bestehen aus mit Polyurethan infiltrierten Gipsmatrizen. Deren Festigkeit oder auch Langzeitstabilität ist gegenüber mit herkömmlichen, spanenden Fertigungsverfahren hergestellten Bauteilen vergleichsweise gering. Daher kann zukünftig auch die Verwendung metallischer Prototypen untersucht werden. Diese könnten durch Lasersintern (GLS) oder auch mittels spanender Fertigungsverfahren hergestellt werden. Für Letztere kann, analog zur standardisierten Ausgabe der RP-Fertigungsinformationen, auch eine automatisierte Ausgabe eines parametrisierten Codes für die NC-Verarbeitung erfolgen. Erste Versuche hierzu wurden bereits unter Verwendung der Steuerung Heidenhain TNC 426/430 unternommen. Durch die Verwendung metallischer Bauelemente ergeben sich dann auch verbesserte Möglichkeiten zur Integration zusätzlicher Lagerungen sowie zur Verwendung weiterer Greifwerkzeuge etc.
- **Erweiterung der Software-Anwendungen:**  
Die aktuell verwendeten Softwaremodule wurden zur Untersuchung der Vorteile der Teilfunktionen des neuen Systemkonzepts prototypisch aufgebaut. Durch ihre modulare Bauweise können sie beliebig erweitert werden. So ist die Bau- und Arbeitsraumdefinition durch eine schichtweise Durchführung paralleler Ebenenschnitte im Hinblick auf die Vorgabe 3-dimensionaler Räume erweiterbar, wodurch eine verbesserte Berücksichtigung von Bauräumen und

Hindernissen erreicht werden könnte. Weiterhin könnten bewegte Elemente (z. B. in einer Roboterzelle) mit in die Auslegung einbezogen werden. Zuletzt könnte die aktuell mögliche Entwicklung offener kinematischer Ketten um eine Auslegung geschlossener kinematischer Ketten erweitert werden.

- **Integration aller Softwaremodule in einer stand-alone Anwendung:**

Die zum jetzigen Zeitpunkt verwendeten Teilmodule der Software zur Kinematikentwicklung wurden in Matlab<sup>®</sup> (The MathWorks<sup>™</sup>) implementiert. Für das weitere Vorgehen ist zur Verbesserung der Flexibilität der Anwendung eine Übertragung und Implementierung aller Teilelemente in einem stand-alone Werkzeug denkbar. Dabei kann zusätzlich eine vollständige Integration bislang unberücksichtigter Softwareelemente sowie Repräsentationen der Bausteinelemente erfolgen. So kann dann beispielsweise die Kollisionserkennung unter Verwendung der Bounding-Boxes mit einbezogen werden.

- **Integration und Erweiterung der Steuerbox:**

Die derzeitige Steuerbox ermöglicht die Verwendung von bis zu drei unabhängigen Modellbau-Servoantrieben. Zu einer allgemeinen Orientierungserfüllung räumlicher Kinematiken sind diese jedoch nicht ausreichend. Daher kann im weiteren Vorgehen die Verwendung einer höheren Antriebsanzahl sowie weiterer Arten, eventuell auch umlaufender Antriebe ermöglicht werden. Um zusätzlich die Kompaktheit des Systems zu verbessern, ist die Integration der Funktionalitäten der Steuerbox in die Versuchsumgebung denkbar. Die notwendigen Anschlüsse für die Antriebe könnten dabei direkt an der Versuchsplattform angebracht werden. Darüber hinaus könnte aber auch eine Dezentralisierung der Steuerung durchgeführt werden.

## 8. Literatur

- 3D Systems, 1988. *Stereolithography Interface Specification*, 3D Systems Inc., Firmenschrift.
- Abel, D. & Bollig, A., 2006. *Rapid control prototyping*. Berlin: Springer.
- Alam, M., Mavroidis, C., Langrana, N. & Bidaud, P., 1999. Mechanism design using rapid prototyping. *10th world congress on the theory of machines and mechanisms*. Oulu, Finland 20-24 June 1999.
- Andreasen, M. M. & Hein, L., 1987. *Integrated Product Development*. Berlin: Springer.
- Asada, H. & Slotine, J.-J.E., 1986. *Robot Analysis and Control*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Bauer, C.-O. (Hrsg.), 1991. *Handbuch der Verbindungstechnik*. München: Carl Hanser.
- Beek van, B. & de Jager, B., 1997. RRR-robot design: basic outlines, servo sizing, and control. *1997 IEEE International Conference on Control Applications*. Hartford, USA 5-7 October 1997, pp. 36-41.
- Berger M. & Matthes, J., 2006. MATTOOL – Eine Sammlung modularer Algorithmen zur rechnergestützten Antriebs- und Getriebeauslegung mittels Mathcad. In: Verein Deutscher Ingenieure, 2009. *VDI Berichte 1966*, Düsseldorf: VDI-Verlag, pp. 403-21.
- Beitz, W. & Grote, K.-H. (Hrsg.), 2001. *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Auflage*. Berlin: Springer.
- Bi, Z.M. & Zhang, W.J., 2001. Concurrent Optimal Design of Modular Robot Configuration. *Journal of Robotic Systems*, 18(2), pp. 77-87.
- Binnard, M. & Cutkosky, M.R., 1998. Building block design for layered shape manufacturing. *1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*. Atlanta, USA 13-16 September 1998, no. DETC98/DFM-12.
- Bloch, S.S., 1951. *Angenäherte Synthese von Mechanismen*. Berlin: Verlag Technik.
- Bolognini, F., Seshia, A.A. & Shea, K., 2007. A Computational Design Synthesis Method for MEMS Using COMSOL. *COMSOL Users Conference 2007*, Singapore 15 November 2007.
- Brooks, R.A. & Lozano-Pérez, T., 1982. A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation. In: Massachusetts Institute of Technology, 1982. *A. I. Memo No. 684*, Cambridge: MIT press.

- Burmester, L., 1888. *Lehrbuch der Kinematik*. Leipzig: Verlag Arthur Felix.
- Cham, J.G. et al., 1999. Layered Manufacturing with embedded Components: Process planning Considerations. ASME DETC99, Las Vegas, USA 12-15 September 1999, DFM-8910.
- Chedmail, P. & Ramstein, E., 1996. Robot Mechanism Synthesis and Genetic Algorithms. *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Minneapolis, USA 22-28 April 1996, pp. 3466 – 3471.
- Chocron, O. & Bidaud, P., 1997. Genetic Design of 3D Modular Manipulators. *1997 International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, USA 20-25 April 1997, pp. 223-228.
- Chua, C.K., Leong, K.F. & Lim, C.S., 2003. *Rapid Prototyping*. Singapore: World Scientific.
- Chua, C.K., Teh, S.H. & Gay, R.K.L., 1999. Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(8), pp. 597-603.
- Clark, S. & Lin, Y.-J., 2007. CAD tools integration for robot kinematics design assurance with case studies on PUMA robots. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(3), pp. 240-248.
- Connor, A.M., Douglas, S.S. & Gilmartin, M.J., 1995. The Synthesis of Hybrid Five-Bar Path Generating Mechanisms Using Genetic Algorithms. *GALESIA - Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, Sheffield, UK 12-14 September 1995, Conf.Publ.No.414, pp. 313-318.
- Corke, P.I., 1996. A Robotics Toolbox for MATLAB. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 3(1), pp. 24-32.
- Corves, B. & Brix, T., 2009. Digitale Mechanismen- und Getriebebibliothek e.V. Verfügbar unter: [www.dmg-lib.de](http://www.dmg-lib.de), abgerufen: März 2009.
- Craig, J.J., 1989. *Introduction to robotics: mechanics and control*. New York: Pearson Education Inc.
- De Laurentis, K.J., Kong, F.F. & Mavroidis, C., 2002. Procedure for Rapid Fabrication of non-assembly Mechanisms with embedded components. *AMSE 2002 DETC/CIE*, Montréal, Canada 29 September - 2 October 2002, DETC2002/MECH-34350.
- De Laurentis, K.J., Mavroidis, C. & Kong, F.F., 2004. Rapid Robot Reproduction. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 11(2), pp. 86-92.

- Denavit, J. & Hartenberg, R.S., 1955. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of applied mechanics*, 22(2), pp. 215-221.
- Desa, S. & Roth, B., 1985. Synthesis of Control Systems for Manipulators Using Multivariable Robust Servomechanisms Theory. *The International Journal of Robotics Research*, 4(18), pp. 18-34.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 1985. DIN IEC 63, *Vorzugsreihen für die Nennwerte von Widerständen und Kondensatoren*.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 1974. DIN 323, *Normzahlen und Normzahlreihen*.
- Ding, H. & Huang, Z., 2007a. A unique representation of the kinematic chain and the atlas database. *Mechanism and Machine Theory*, 42(6), pp. 1264-1279.
- Ding, H. & Huang, Z., 2007b. A new theory for the topological structure analysis of kinematic chains and its applications. *Mechanism and Machine Theory*, 42(10), pp. 637-651.
- Dittrich, G. & Wehn, V., 1991. Ebene Schubkurbel mit einstellbarer Versetzung. *Der Konstrukteur*, 22(3), pp. 29,30.
- Ebert-Uphoff, I., Gosselin, C.M., Rosen, D.W., & Laliberté, T., 2005. Rapid Prototyping for Robotics. In: Kordic, V., Lazinica, A. & Merdan, M., 2005. *Cutting Edge Robotics*. Mammendorf: pro literatur Verlag, pp. 17-46, 2005.
- Europäische Normungsorganisation (EN), 1996. EN ISO 8373 *Industrieroboter Wörterbuch*.
- Fischer, M. et al., 2008. Eine durch Funktionsprototypen unterstützte Methode zur Kinematikentwicklung. In: Verein Deutscher Ingenieure, 2008. *VDI-Berichte 2050*, Düsseldorf: VDI-Verlag, pp. 227-240.
- Fischer, M., Richter, C., Irlinger, F. & Lüth, T.C., 2009. Entwicklung einer mechatronischen Türkinematik mit zwei Freiheitsgraden. 8. *Kolloquium Getriebetechnik*, Aachen, Deutschland 16-18 September 2009, pp. 33-46.
- Fischer, M., Vodermaier, C., Irlinger, F. & Lueth, T.C., 2010. Instant actuation for Rapid Prototyping mechanisms. Actuator 2010, Bremen, Deutschland 14-16 Juni 2010, accepted paper.
- Funes, P., Lapat, L. & Pollack, B., 2000. EvoCAD: Evolution Assisted Design. *Artificial Intelligence in Design 2000*, Worcester, USA 26-29 Juni 2000, pp. 21-24, 2000.
- Gardner, J. F. & Velinsky, S. A., 2000. Kinematics of Mobile Manipulators and Implications for Design. *Journal of Robotic Systems*, 17(6), pp. 309-320.

- Gausemeier, J. & Feldmann, K. (Hrsg.), 2006. *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Gebhardt, A., 2003. *Rapid Prototyping*. München: Carl Hanser Verlag.
- Gebhardt, A., 2007. *Generative Fertigungsverfahren*. München: Carl Hanser Verlag.
- Gibson, I. (ed.), 2002. *Software Solutions for Rapid Prototyping*. London: Professional Engineering Publishing Limited.
- Gong, J., Zhang Y. & Gao, F., 2007. Type synthesis of parallel robot based on the kinematic element. *12th IFToMM World Congress*, Besancon, France 17-21 Juni 2007.
- Grimm, T., 2004. *User's Guide to Rapid Prototyping*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers.
- Gross, D., Hauger, W. & Schnell, W., 2007. *Technische Mechanik 2*. Berlin: Springer.
- Grübler, M., 1917. *Getriebelehre - Eine Theorie des Zwangslaufs und der eigenen Mechanismen*. Berlin: Springer.
- Gupta, K.C. & Roth, B., 1982. Design considerations for manipulator workspace. *ASME Journal of Mechanical Design*, 104(4), pp. 704-711.
- Hain, K., 1963. *Getriebelehre*. München: Carl Hanser Verlag.
- Hollerbach, J.M., 1985. Optimum Kinematic Design for a Seven Degree of Freedom Manipulator. *2nd International Symposium of Robotics Research*, Kyoto, Japan 20-23 August 1985.
- Hornby, G.S. & Pollack, J.B., 2001. The Advantages of Generative Grammatical Encodings for Physical Design. *3<sup>rd</sup> Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, Korea 27-30 Mai 2001, pp. 600-607.
- Hornby, G.S., Lipson, H. & Pollack, J.B., 2001. Evolution of Generative Design Systems for Modular Physical Robots. *2001 International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea 21-26 Mai 2001, 4, pp. 4146-4151.
- Hornby, G.S. & Lipson, H., 2003. Generative Representations for the Automated Design of Modular Physikal Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(4), pp. 703-719.
- Hoyer, J., Uhl, C. & Beyer, C., 2006. Virtual & Rapid Prototyping – Bestandsaufnahme aktueller Produkte und deren Einsatz. In: Verein Deutscher Ingenieure, 2006. *VDI Fortschritt-Berichte 2(656)*, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Hull, C.W., 1986. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patent: US 4,575,330, Mar. 11, 1986.

- Irlinger, F., 1993. Objektorientierte Programmierung in der Getriebetechnik. In: Verein deutscher Ingenieure, 1993. *VDI Reihe 1(220)*, Düsseldorf: VDI Verlag.
- Irlinger, F., Günther, D., Scheuenpflug, M., & Lüth, T.C., 2007. Von der Idee zum Mikrofluidsystem. 8. *Chemnitzer Fachtagung Mikromechanik & Mikroelektronik*, Chemnitz, Deutschland 14-15 November 2007, pp. 11-15.
- Kataria, A. & Rosen, D.W., 2001. Building around inserts: methods for fabricating complex devices in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 7(5), pp. 253-261.
- Kerle, H., Pittschellis, R., & Corves, B., (2007). *Einführung in die Getriebelehre - Analyse und Synthese ungleichmäßig übersetzender Getriebe*. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag.
- Ketchel, J.S. & Larochelle, P.M., 2007. Computer-aided manufacturing of spherical mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 42(2), pp. 131-146.
- Khatib, O., 1986. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1), pp. 90-98.
- Kim, J. & Khosla, P.K., 1993. Design of Space Shuttle Tile Servicing Robot: An Application of Task Based Kinematic Design. *1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, USA 2-6 Mai 1993, pp. 867-874.
- Klein, C.A. & Blaho, B.E., 1987. Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 72(6), pp. 72-83.
- Kucuk, S. & Bingul, Z., 2005. Robot Workspace Optimization Based on a Novel Local and Global Performance Indices. *IEEE ISIE 2005*, Dubrovnik, Croatia 20-23 Juni 2005, pp. 1593-1598.
- Kumar, A. & Patel, M.S., 1986. Mapping the Manipulator Workspace Using Interactive Computer Graphics. *The International Journal of Robotics Research*, 5(2), pp. 122-130.
- Laliberté, T., Gosselin, C. M. & Côté, G., 2001. Practical Prototyping: A Rapid Prototyping Framework for Fast and Cost-Effective Design of Robotic Mechanism Prototypes. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 8(3), pp. 43-52.
- Larochelle, P.M., Schuler, J.M. & Ketchel, J.S., 2006. SphinxCAM-Pro|E: Computer-Aided Modeling and Manufacturing of Spherical Mechanisms Via the Web. *ASME IDECT/CIE2006*, Philadelphia, USA 10-13 September 2006, DECT2006-99103, pp. 339-347.

- Latombe, J.-C., 1993. *Robot Motion Planning*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Lee, C.S.G., 1982. Robot Arm Kinematics, Dynamics, and Control. *Computer*, 15(12), pp. 62-80.
- Leong, K.F., Chua C.K. & Ng Y.M., 1996. A study of stereolithography file errors and repair Part 1 – Generic solutions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 12(6), pp. 407-414.
- Liao, Y.S., Li, H.C. & Chen, M.T., 2007. The study of rapid prototyping process with embedded functional inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 192, pp. 68-74.
- Lin, C.-C.D. & Freudenstein, F., 1986. Optimization of the Workspace of a Three-Link Turning-Pair Connected Robot Arm. *The International Journal of Robotics Research*, 5(2), pp. 104-110.
- Lindemann, U., 2009. *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin: Springer.
- Liou, F.W., 2008. *Rapid prototyping and engineering applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Lipson, H., 2007. Printable 3D Models for Customized Hands-on Education. *Mass Customization and Personalization (MCPC) 2007*, Cambridge, USA 7-10 Oktober 2007.
- Lipson, H. & Pollack, J.B., 2000. Automatic design and manufacture of robotic lifeforms. *Nature*, 406(6799), pp.974-978.
- Lohn, J.D. & Hornby, G.S., 2006. Evolvable Hardware – Using Evolutionary Computation to Design and Optimize Hardware Systems. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(1), pp. 19-27.
- Lohse, P., 1983. *Getriebesynthese, Bewegungsabläufe ebener Koppelmechanismen*. Berlin: Springer.
- Lozano-Pérez, T., 1983. Spatial Planning: A Configuration Space Approach. *IEEE Transactions on Computers*, C-32(2), pp. 108-120.
- Lozano-Pérez, T., 1987. A Simple Motion-Planning Algorithm for General Robot Manipulators. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(3), pp. 224-238.
- Lu, K.-J. & Kota, S., 2006. Topology and Dimensional Synthesis of Compliant Mechanisms Using Discrete Optimization. *Journal of Mechanical Design*, 128(5), pp. 1080-1091.

- Luck, K. & Modler, K.-H., 1995. *Getriebetechnik – Analyse, Synthese, Optimierung*. Heidelberg: Springer.
- Lüth, T.C., 1992. Automated Planning of Robot Workcell Layouts. *1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France 12-14 Mai 1992, pp. 1103-1108.
- Lüth, T.C., Nassal, U.M. & Rembold, U., 1995. Reliability and Integrated Capabilities of Locomotion and Manipulation for Autonomous Robot Assembly. *Journal on Robotics and Autonomous Systems*, 14, pp. 185-198.
- Lum, M.J.H., Rosen, J., Sinanan, M.N. & Hannaford, B., 2004. Kinematic Optimization of a Spherical Mechanism for a Minimally Invasive Surgical Robot. *2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, USA 26 April – 4 Mai 2004, pp. 829-834.
- Maclay, D., 2000. Click and code. *IEE Review May 2000*, pp. 25-28.
- Maletsky, L.P. & Hale, R.D., 2003. The Practical Integration of Rapid Prototyping Technology into Engineering Curricula. *38th Midwest Section Conference of the American Society for Engineering Education*, Rolla, USA 10-12 September 2003.
- Matsumaru, T., 1995. Design and control of the modular robot system: TOMMS. *1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, Nagoya, Japan 21-27 Mai 1995, pp. 2125-2131.
- Mavroidis, C., DeLaurentis, K.J., Won, J. & Alam, M., 2001. Fabrication of Non-Assembly Mechanisms and Robotic Systems Using Rapid Prototyping. *Journal of Mechanical Design*, 123(4), pp. 516-524.
- Mayorga, R.V. & Carrera, J., 2006. A Manipulator Performance Index based on the Jacobian Rate of Change: A Motion Planning Analysis. *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, USA 15-19 Mai 2006, pp. 4220-4226.
- Meyer zur Capellen, W., 1965. Systematik spärlicher Viergelenkgetriebe. *Industrieanzeiger*, 87(75), pp. 169-174.
- Moravec, H.P., 1980. *Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover*. Ph. D. Stanford: Stanford University.
- Mostermann, P.J., 2006. Automatic Code Generation: Facilitating New Teaching Opportunities in Engineering Education. *36<sup>th</sup> ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, San Diego, USA 28-31 Oktober 2006, pp. 1-6, 2006.
- Murata, S. et al., 2000. Hardware design of modular robotic system. *Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan 30 Oktober – 5 November 2000, pp. 2210-2217.

- Nethery, J.F. & Spong, M.W., 1994. Robotica: A Mathematica Package for Robot Analysis. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 1(1), pp. 13-20.
- Petterson, M., 2008. Design Optimization in Industrial Robotics; Methods and Algorithms for Drive Train Design. *Linköping Studies in Science and Technology*. Dissertations, No. 1170.
- Pott, P.P. & Schwarz, M.L.R., 2007. Das Verhältnis von Arbeitsraum zu Bauraum epizyklischer Kinematiken mit sechs Freiheitsgraden. *Biomed Tech*, 52(5), pp. 323-336.
- Pucheta, M. & Cardona, A., 2005. Type Synthesis of planar Linkage Mechanisms with rotoidal and prismatic joints. *Mecánica Computacional*, 14, pp. 2703-2730.
- Pucheta, M. & Cardona, A., 2007. Kinematics Synthesis of planar multi-loop Linkage Mechanisms for multiple Tasks Purposes. *Mecanica Computacional*, 26, pp. 2703- 2730.
- Rankers, A., 2002. SAM (Simulation and Analysis of Mechanisms). *ASME 2002 DETC*, Montreal, Canada 29 September – 2 Oktober 2002.
- Rajagopalan, S. & Cutkosky, M.R., 1998. Tolerance representation for mechanism assemblies in layered manufacturing. *1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Atlanta, USA 13-16 September, no. DETC98/DFM-5726.
- Rajagopalan, S. & Cutkosky M.R., 1999. Optimal pose selection for in-situ fabrication of planar mechanisms. *1999 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, USA 12-15 September, no. DETC99/DFM-8958.
- Reuleaux, F., 1875. *Theoretische Kinematik (Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens)*. Braunschweig: Vieweg.
- Reinhart, G. & Spitzweg, M., 2007. Einsatz von Physikmodellen zur Simulation bei der Entwicklung von Maschinen und Anlagen. In: Gausemeier, J., Grafe, M., eds., 2007. *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*, Paderborn: HNI-Verlag, pp. 333-348.
- Reinhart, G. & Krug, S., 2009. Robotersynthese für die Kleinserie – Effizient von der Planung bis zum Einsatz. In: M. Zäh, G. Reinhart, (Hrsg.) 2009. *Seminarberichte (2009) 91: Robotik in der Kleinserienproduktion – Die Zukunft der Automatisierungstechnik*. München: Herbert Utz.
- Richter, C., Fischer, M., Irlinger, F. & Lueth, T.C., 2009. A Spatial Path Specification System for Mechanism Development. *2009 IEEE International Conference on Human System Interaction*, Catalonia, Italien 21-23 Mai 2009.

- Rieffel, J. & Pollack, J., 2005. Evolving Assembly Plans for Fully Automated Design and Assembly. *NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware*, Washington, USA 29 Juni – 1 Juli 2005, pp. 165-170.
- Roberts, S., 1875. On three bar motion in plane space. *Proc. Lond. Math. Soc.*, 7, pp. 14-23.
- Roth, B., 1975. Performance evaluation of manipulators from a kinematic viewpoint. *NBS Special Publication 1975*, pp. 39-61.
- Salisbury, J.K. & Craig, J. J., 1982. Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues. *International Journal of Robotics Research*, 1(1).
- Sancibrian, R., Garcia, P., Viadero, F. & Fernández, A., 2006. A general procedure based on exact gradient determination in dimensional synthesis of planar mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 41(2), pp. 212-229.
- Schmitz, D., Khosla, P. & Kanade, T., 1988. The CMU reconfigurable modular manipulator system. *Proc. of the International Symposium and Exposition on Robots 1988*, pp. 473-488.
- Schneider P.J. & Eberly, D.H., 2003. *Geometric Tools for Computer Graphics*. San Francisco: Elsevier Science.
- Smith, C. & Christensen H.I., 2007. Using COTS to Construct a High Performance Robot Arm. *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rom, Italien 10-14 April 2007, pp. 4056-4063.
- Sohn, W.J. & Freudenstein, F., 1986. An application of dual graphs to the automatic generation of the kinematic structures of mechanisms. *Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design*, 108(2), pp. 392-398.
- Stopp, S., Wolff, T., Irlinger, F. & Lüth, T.C., 2008. A new method for printer calibration and contour accuracy manufacturing with 3D-print technology. *Rapid Prototyping Journal*, 14(3), pp. 167-172.
- Strauchmann, H., 2009. Softwaretool APPROX 5.2, TU Dresden, Verfügbar unter: <http://www.htwk-leipzig.de/fbme/me1/strauchmann/approx/index.htm>, abgerufen: März 2009.
- Studer, G. & Lipson, H., 2006. Spontaneous emergence of self-replicating structures in Molecube automata. *10th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, Bloomington, USA 3-7 Juni 2006, pp. 227-233.
- Szydlowski, W.M., 2001. Using a Rapid Prototyping Machine in the Integrated Kinematics, Dynamics, and Machine Design Lab. *31<sup>st</sup> ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, Reno, USA 10-13 Oktober 2001.

- Tang, C.S. & Liu, T., 1993. The degree code- a new mechanism identifier. *ASME Journal of Mechanical Design*, 115(3), pp. 627-630.
- Todorov, T.S., 2003. Synthesis of four-bar mechanisms by Freudenstein-Chebyshev. *Mechanism and Machine Theory*, 37(12), pp. 1505-1512.
- Tseng, M.M., Jiao, J. & Su, C.-J. 1998. Virtual prototyping for customized product development. *Integrated Manufacturing Systems*, 9(6), pp. 334 – 343.
- Vale, C.A.W. & Shea, K., 2002. Learning Intelligent Modification Strategies in Design Synthesis. *The 2003 AAAI Spring Symposium*, Palo Alto, USA 24–26 März 2003, pp. 24-26.
- Wampler, C.W., 2007. Numerical Algebraic Geometry and Kinematics. *SNC'07 - International workshop on Symbolic-numeric computation*, London, UK 25-27 Juli 2007, pp. 29-32.
- Wann, G. & Lohe, R., 2006. Bewegungs-Design im Raum – Lösen, Planen, Optimieren und Bewerten technischer Bewegungsaufgaben im Raum. In: Verein Deutscher Ingenieure, 2006. *VDI-Berichte 1966*, Düsseldorf: VDI-Verlag, pp. 111-137.
- Weigert, T. et al., 2008. Automated Code Generation for Industrial-Strength Systems. *IEEE International Computer Software and Applications Conference - COMPSAC*, Turku, Finland 28 Juli – 1 August 2008, pp. 464-472, 2008.
- Wendt, W. & Lutz, H., 2007. *Taschenbuch der Regelungstechnik*. Frankfurt: Harri Deutsch.
- Wisspeintner, T., Nowak, W. & Bredenfeld, A., 2006. Volksbot – a flexible component-based mobile robot system. *Lecture Notes in Computer Science*, 4020, pp. 716-723.
- Won, J., DeLaurentis K.J. & Mavroidis, C., 2000. Fabrication of a robotic hand using rapid prototyping. *2000 ASME DETC*, Baltimore, USA 10-13 September 2000, DETC00/MECH-14203.
- Yang, A.T. & Freudenstein, F., 1964. Application of dual-number quaternion algebra to the analysis of spatial mechanisms. *ASME Journal of applied mechanics*, 86(2), pp. 300-308.
- Yoshikawa, T., 1984. Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy. In: Brady, M. & Paul R.P., 1984. *Robotics Research: The First International Symposium*, Cambridge: The MIT Press, pp. 735-747, 1984.
- Yoshikawa, T., 1985. Manipulability of Robotic Mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, 4(3), pp. 3-9.

Zäh, M. F., Götzfried, A., Gyger, T., Lau, C. & Strasser, G., 2008. Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik – durch Innovationen schnell und flexibel am Markt. In: M. Zäh, G. Reinhart, (Hrsg.) 2008. *Seminarbericht (2008) 90: Rapid Manufacturing und digitale Fabrik – durch Innovationen schnell und flexibel am Markt*. München: Herbert Utz.