

Sven Brudniok

**Methodische Entwicklung hochintegrierter
mechatronischer Systeme am Beispiel eines
humanoiden Roboters**

Methodical development of highly integrated
mechatronic systems by the example of a humanoid
robot

Band 26

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: Institut für Produktentwicklung
Universität Karlsruhe (TH), 2007

Alle Rechte vorbehalten

Druck: E&B-printware, Karlsruhe
Tel.: +49 (0)721 962 26 900

ISSN: 1615-8113

Methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme am Beispiel eines humanoiden Roboters

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Sven Brudniok
aus Lichtenau/Bayern

Tag der mündlichen Prüfung: 18. September 2007
Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. R. Dillmann

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftreihe dient als Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hoch belasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung - sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie - zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 26

Die Entwicklung mechatronischer Systeme spielt heute sowohl im klassischen Maschinenbau wie auch im Fahrzeugbau eine entscheidende Rolle. Alle wesentlichen Maschinentypen und Fahrzeuge werden durch die Kombination von mechanischem Grundsystem, elektrischer Aktorik und integrierter Informationsverarbeitung und Regelung maßgeblich in ihren Nutzungspotentialen verbessert. Dabei gibt es erhebliche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Disziplinen, die zu beachten sind. Auch bei mechatronischen Systemen ist der mechanische Anteil von entscheidender Bedeutung, da er sowohl was die Wertschöpfung betrifft als auch beim Leistungsumsatz sowie bei der Realisierung der eigentlichen Arbeitsfunktion das Wirksystem darstellt. So bildet z.B. beim Kraftfahrzeug trotz des heute enorm hohen Anteils an Elektrik und Elektronik die Hauptfunktion der sichere Transport, und auch der Komfort der Insassen wird im Wesentlichen durch die mechanischen Systeme bestimmt. In solchen mechatronischen Systemen existieren große Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Teilsystemen, die sich z. B. an der modernen Motorentechnik oder auch den modernen Antriebssträngen zeigen lassen. Neben Kraftfahrzeugen bildet heute die Robotertechnik ein weiteres herausragendes Beispiel hochkomplexer mechatronischer Systeme. Roboter werden seit vielen Jahren im Umfeld der industriellen Fertigung eingesetzt und unterstützen dort in der Produktion den Menschen bei schwierigen oder gefährlichen Aufgaben, wie z. B. in den Schweißstraßen von Karosseriewerken oder in Lackierwerken. Industrieroboter zeichnen sich durch hohe Genauigkeit und extreme Steifigkeit sowie Leistungsfähigkeit aus. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sie durch entsprechende Sicherheitsvorrichtungen vom Menschen getrennt werden müssen, um diesen vor vom Roboter ausgehenden Gefahren zu schützen. Ein neuer Trend, der sich insbesondere in der älter werdenden Bevölkerung in unseren modernen Industriegesellschaften begründet, ist die Service-Robotik. Prognosen sagen voraus, dass diese Art von Maschinen im 21. Jahrhundert die Bedeutung des Fahrzeugs im 20. Jahrhundert erreichen wird, d.h., dass diese Systeme wie heute das Kraftfahrzeug im Alltag flächendeckend zur Verfügung stehen werden. Service-Roboter sind im Gegensatz zu Industrierobotern dadurch gekennzeichnet, dass sie ihre Aufgaben in enger Interaktion mit den Menschen verrichten müssen. Hier verbietet sich die Methode, mechanische Genauigkeit durch hohe Steifigkeit zu erzielen, da diese immer mit hohen Massen und somit gespeicherter kinetischer Energie verbunden ist. Für diese Art von Robotern müssen völlig neue Konstruktionsprinzipien und Zielsysteme gelten. Sie stellen als mechatronische Systeme eine große Herausforderung für die Entwickler dar, sowohl im Bereich der Mechanik als auch im Bereich der Elektronik und der Informationsverarbeitung. An der Universität Karlsruhe (TH) wird im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 588

„Humanoide Roboter - Lernende und kooperierende multimodale Roboter“ an neuen Lösungen für sogenannte humanoide Roboter gearbeitet. Humanoide Roboter zeichnen sich dadurch aus, dass sie in ihrer Gestalt den Menschen angenähert werden, um so die Akzeptanzschwelle zu senken. In dem Sonderforschungsbereich werden sowohl neue informationstechnische Strukturen zur Kommunikation und Regelung dieser mechatronischen Systeme erforscht wie auch neue Antriebs- und Strukturlösungen für die mechanische Hardware und den Aufbau. Im Rahmen dieses Projekts hat Herr Dr.-Ing. Sven Brudniok seine Forschungsarbeit angelegt. Er war maßgeblich an der Entwicklung des humanoiden Roboters „ARMAR“ beteiligt und hat auf der Basis dieser praktischen Entwicklungsarbeit neue Ansätze für die methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme formuliert und evaluiert. Herr Dr.-Ing. Sven Brudniok setzte sich zum Ziel, aus seinen praktischen Entwicklungsarbeiten an diesem hochkomplexen mechatronischen System ein Vorgehensmodell abzuleiten, mit dem der Entwicklungsprozess durchgehend beschrieben werden kann. Dabei postuliert er, dass in der mechatronischen Systementwicklung praktisch immer eine Domäne dominierend ist, die er hier im Maschinenbau bzw. den mechanischen Strukturen sieht. Sein Ansatz definiert, ausgehend von der dominierenden Domäne (hier dem Maschinenbau), das Vorgehensmodell, das dann die weiteren Domänen durch entsprechende Anforderungen und Randbedingungen und angekoppelte Prozesse im Zielsystem berücksichtigt. Das vorgeschlagene Vorgehensmodell ist übertragbar und für die Entwicklung jeder Art hochkomplexer „maschinenbauzentrierter“ mechatronischer Systeme geeignet. Hierbei werden während des gesamten Entwicklungsprozesses mechanischer Strukturen die wesentlichen Randbedingungen und Aspekte der Elektronik, Informationsverarbeitung und Regelungstechnik berücksichtigt, in dem diese in einem Zielsystem begleitend beschrieben werden. Die Wechselwirkungen zwischen den Domänen werden dabei parallel erfasst. Herr Dr.-Ing. Sven Brudniok setzte sich zum Ziel, im Detaillierungsgrad über die global beschreibenden Entwicklungsprozessmodelle hinauszugehen, um so in der konkreten Entwicklungsarbeit eine wirkungsvolle Unterstützung zu leisten. Die Arbeit ist eine ausgezeichnete Basis für die Entwicklung hochkomplexer mechatronischer Systeme und zeigt wichtige Aspekte für die zukünftige Forschung auf dem Gebiet der Entwicklungsmethodik auf.

Albert Albers

Kurzfassung

Moderne mechatronische Systeme werden für ein großes Leistungsspektrum entwickelt. Sie verrichten komplexe Aktionen, die anhand von Modellen an die vielschichtigen Informationen aus der Umwelt angepasst sind, die vom System registriert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Interaktion und multimodale Kommunikation des Menschen mit dem mechatronischen System. Um solch hochwertige Ziele realisieren zu können, müssen mechatronische Systeme eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Anforderungen erfüllen. Daher ist in diesen Systemen eine große Anzahl von Teilsystemen aus verschiedenen Domänen enthalten, die zu einem komplexen Gesamtsystem kombiniert sind. Zwischen den Teilsystemen bestehen wiederum vielfältige Wechselwirkungen, die in der Entwicklung beachtet werden müssen, allerdings nicht immer offensichtlich zu erkennen sind. Weiterhin existieren in der Technik viele Möglichkeiten, wie die jeweiligen Teilsysteme für ihre spezifische Funktionserfüllung aufgebaut werden können. Insgesamt ergibt sich hieraus ein großer und unübersichtlicher Lösungsraum für den Aufbau von komplexen mechatronischen Systemen.

In dieser Arbeit wird ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von mechatronischen Systemen hergeleitet. Dieses ist an Systeme angepasst, deren Systemelemente räumlich und funktional stark integriert sind (hochintegrierte Systeme) und die über einen mechanischen Anteil verfügen, der aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Anteilen aller Domänen dominierend ist. Diese Merkmale ermöglichen eine hierarchische Gliederung in Teilsysteme und das Erkennen der Wechselwirkungen dazwischen. Das Vorgehensmodell beschreibt einen Prozess, in dem die Entwicklung eines komplexen Systems auf eine Aneinanderreihung von wiederholbaren Einzelschritten abgebildet wird, und der sich an den Informationsflüssen, die zwischen den Entwicklungen der Teilsysteme verlaufen, orientiert. Es wird eine Methode vorgestellt, die Wechselwirkungen im Entwicklungsprozess beachtet, was zu einem durchgängigen Informationsfluss im Prozess führt. Als Vorarbeit werden die technischen Lösungen der Teilsysteme, die im Stand der Technik enthalten sind, in Klassierungen abgebildet. Dies ermöglicht einen Auswahlprozess anhand von spezifischen Systemeigenschaften. Das Ergebnis des Entwicklungsprozesses ist ein Produkt, das den Anforderungen entspricht und bei dessen Entwicklung die Möglichkeiten und Kombinationen existierender Teillösungen beachtet wurden. Mit dem Vorgehensmodell für die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen sind im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 588 „Humanoide Roboter – Lernende und kooperierende multimodale Roboter“ eine Vielzahl von mechatronischen Systemen humanoider Roboter entstanden. Exemplarisch wird hier die Methode an der Entwicklung der Arme eines Humanoiden Roboters „ARMAR III“ angewandt.

Abstract

Modern mechatronic systems are developed to carry out a large variety of functions. They perform complex actions based on models of the scenario. To do so the models use multi-layered information about the environment, which is registered by the system. An example for this is the interaction and multimodal communication of humans with the mechatronic system. In order to be able to realise such challenging objectives, mechatronic systems must satisfy diverse requirements. Therefore, a large number of subsystems from different domains are combined in a complex overarching system. Between these subsystems various reciprocal effects exist, which must be considered throughout the development process. These effects are not always easily recognised. Furthermore, many possibilities exist how each of these subsystems can be set up in order to fulfil their particular requirements. Thus a multi-dimensional solution space must be considered during the development of complex mechatronic systems.

In this work a procedural approach for the development of mechatronic systems is deduced. The presented method is specific to systems, whose components are spatially and functionally strongly integrated (highly integrated systems). These systems are to be considered highly integrated due to the reciprocal effects between all individual and mechanical parts. The abovementioned properties of highly integrated systems enable a hierarchical division of the system and an analysis of the reciprocal effects between the resulting subsystems. This way the development of a complex system is split into a sequence of steps. The progression of this development is determined by the information flow between them and repeatable. A method is presented that considers the above mentioned reciprocal effects. This leads to a continuous procedure during the development process. As preparatory work and using up to date technology, solutions are found for each subsystems and are fit into classifications. This makes a selection process on the basis of specific properties of the subsystems possible. The result of the development process is a product, which fulfils the requirements of the given application and which fully exploits the possibilities of existing partial solutions and their combination.

Using the presented method several systems were successfully developed for the Collaborative Research Center 588 "Humanoid Robots – Learning and Cooperating Multimodal Robots". As an example, in this thesis the development of the arm of the humanoid robot "ARMAR III" is analysed in detail.

Danksagung

Mein Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, der mir eine eigenständige Arbeitsweise in dem spannenden Forschungsfeld der humanoiden Robotik, in der Lehre und in den weiteren Tätigkeitsfeldern des Instituts ermöglicht hat. Mit zielorientierten Hilfestellungen hat er mich durch die verantwortungsvollen Aufgaben geleitet. Hierbei konnte ich viele wertvolle Erfahrungen sammeln.

Besonders Danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann, der das Korreferat dieser Arbeit übernommen hat. Als Sprecher des Sonderforschungsbereiches 588 „Humanoide Roboter - Lernende und kooperierende multimodale Roboter“ hat er ein fruchtbares Umfeld für dieses äußerst interessante Themengebiet aufgebaut, an dem ich mit Freude während meiner Zeit am Institut für Produktentwicklung mitwirken durfte. Die in dieser Arbeit beschriebenen Entwicklungen von Robotersystemen sind im Rahmen dieses Sonderforschungsbereiches entstanden.

Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Burger, der als Leiter der Forschungsgruppe Mechatronik und Messtechnik meinem Vorgehen richtungweisende Impulse gegeben hat.

Herr Dipl.-Ing. Norbert Burkardt hat mit seinem umfangreichen Wissen über Methoden und Vorgehensweisen in langen Diskussionen zur Darstellungsweise des Vorgehensmodells in dieser Arbeit beigetragen, wofür ich ihm danke.

Eine große Unterstützung war mir das gesamte IPEK-Team, in dem ein angenehmes und produktives Klima besteht, welches über das rein berufliche weit hinausgeht. Ein solches Umfeld schafft die Voraussetzungen für das gemeinsame Erreichen von hohen Zielen. Besonders hervorheben möchte ich alle Mitarbeiter des multidisziplinären Projektteams Robotik am IPEK (Herr Dipl.-Ing. Jens Ottnad, Herr Dipl.-Ing. Christian Sauter, Herr Dipl.-Ing. Korkiat Sedchaicharn), die mit mir zusammen den Aufbau der Systeme der Roboter durchlebt haben. Ein großer Dank gilt weiterhin allen Mitarbeitern der institutsinternen mechanischen Werkstatt, die mit viel Ausdauer und Einsatz die sehr komplexen Bauteile der Roboter gefertigt haben. Exemplarisch für die gesamte Werkstatt danke ich dem Feinmechanikermeister Herrn Heinz Mügge, von dessen Wissen und Erfahrungen ich vieles lernen konnte.

Unter den Mitarbeitern im Sonderforschungsbereich war mir Herr Dr. Tamim Asfour stets eine große Hilfe. Ihm ist es möglich, eine Brücke zwischen den informationstechnischen Anteilen in diesem Forschungsvorhaben und der Mechanik zu legen.

Ermöglicht wurde die Entstehung dieser Arbeit durch meine Eltern, die mein Leben – in all seinen Höhen und Tiefen – beständig unterstützt haben.

Augsburg, Januar 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufbau und Inhalt.....	4
2	Stand der Technik	6
2.1	Systeme humanoider Roboter	6
2.1.1	Forschungsprojekte	6
2.1.2	Unterschiede zwischen humanoiden Robotern und Industrierobotern	18
2.1.3	Zusammenfassung	20
2.2	Vorgehensmodelle, Entwicklungsmethoden.....	21
2.2.1	Entwicklung allgemeiner Systeme	21
2.2.2	Entwicklung mechatronischer Systeme	25
2.2.3	Modelle im Entwicklungsprozess	39
2.2.4	Zusammenfassung	44
3	Zielsetzung der Arbeit	45
4	Systemanalyse, Wechselwirkungen, Vorgehensmodell	47
4.1	Systemanalyse	48
4.1.1	Strukturierungsschema	48
4.1.2	Strukturierung hochintegrierter mechatronischer Systeme	49
4.1.3	Strukturierung des Systems eines humanoiden Roboters	51
4.2	Vorgehen bei der Entwicklung der Teilsysteme	57
4.2.1	Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen	57
4.2.2	Bestimmung der Entwicklungsreihenfolge und der internen Wechselwirkungen	59
4.3	Vorgehensmodell für die Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme	64
4.3.1	Einordnung des Vorgehensmodells in den Produktentstehungsprozess	68
4.4	Zusammenfassung	70
5	Morphologie von Systemelementen, Klassifikation	72
5.1	Eigenschaften und Aufbau von Klassifikationen	72
5.2	Klassifizierungsschema für Einzel- und Mehrfachgelenke	73
5.2.1	Voraussetzungen für die hier eingesetzten Gelenke	73
5.2.2	Einzelgelenke	74
5.2.3	Kombination von Einzelgelenken zu Mehrfachgelenken	79
5.3	Klassifikation der Aktorik.....	85
5.3.1	Systemelemente der Aktorik	86
5.3.2	Arten von Antriebssträngen.....	88
5.3.3	Systemelemente des Antriebsstrangs.....	95
5.4	Klassifikation der Sensorik.....	102
5.4.1	Winkel- und Abstandssensoren.....	103
5.4.2	Sensoren zur Bestimmung des Antriebsmoments	106
5.5	Zusammenfassung	110

6	Konkretisierung des Zielsystems	111
6.1	Zielsystem für das System des humanoiden Roboters	111
6.1.1	Zielsystem für das System des Arms eines humanoiden Roboters.....	113
6.1.2	Langfristige Wirkungen in der Entwicklung	114
6.2	Armkinematik des humanoiden Roboters.....	118
6.2.1	Anthropomorphe Armkinematik.....	118
6.2.2	Entwurf der Kinematik	122
6.2.3	Inverse Kinematik	130
6.3	Regelungskonzept und Anforderungen an die Funktionseinheiten.....	134
6.3.1	Regelungskonzept.....	134
6.3.2	Anforderungen an die Aktorik.....	137
6.3.3	Anforderungen an die Sensorik.....	139
6.4	Rechnerhardware	140
6.5	Objektorientierte Modelle für den Entwurf des Arms.....	143
6.6	Zusammenfassung	146
7	Systementwurf	147
7.1	Systementwurf der Teilsysteme	147
7.2	Prozessabschnitt: Systementwurf Gelenkkomplex Handgelenk	148
7.2.1	Anforderungen an das Handgelenk	148
7.2.2	Handlungsschritt: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks	151
7.2.3	Handlungsschritt: Entwurf der Aktorik	153
7.2.4	Handlungsschritt: Entwurf der Sensorik.....	161
7.2.5	Handlungsschritt: Entwurf der Gelenkrechner und der Tragstruktur.....	163
7.2.6	Ergebnis aus dem Systementwurf des Teilsystems des Handgelenks.....	163
7.3	Prozessabschnitt: Systementwurf Gelenkkomplex Ellbogengelenk.....	164
7.3.1	Anforderungen an das Ellbogengelenk	164
7.3.2	Handlungsschritt: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks	166
7.3.3	Handlungsschritt: Entwurf der Aktorik	167
7.3.4	Handlungsschritt: Entwurf der Sensorik.....	174
7.3.5	Handlungsschritt: Entwurf der Gelenkrechner und der Tragstruktur.....	177
7.3.6	Ergebnis aus dem Systementwurf des Teilsystems des Ellbogengelenks	177
7.4	Prozessabschnitt: Systementwurf Gelenkkomplex Schultergelenk.....	178
7.4.1	Anforderungen an das Schultergelenk.....	178
7.4.2	Handlungsschritt: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks	180
7.4.3	Handlungsschritt: Entwurf der Aktorik	181
7.4.4	Handlungsschritt: Entwurf der Sensorik.....	189
7.4.5	Handlungsschritt: Entwurf der Gelenkrechner und der Tragstruktur.....	193
7.4.6	Ergebnis aus dem Systementwurf des Teilsystems der Schulter.....	193
7.5	Prozessabschnitt: Systementwurf des Gesamtsystems.....	194
7.5.1	Zusätzliche Bauteile	195

7.5.2	Aktorik.....	196
7.5.3	Gesamtsystem des Arms	196
7.6	Zusammenfassung	197
8	Entwürfe von Teilsystemen humanoider Roboter	199
8.1	Arm	199
8.1.1	Arm I.....	199
8.1.2	Arm II.....	201
8.1.3	Arm III.....	204
8.2	Hals.....	204
8.2.1	Hals I	205
8.2.2	Hals II	207
8.3	Torsogelenk	208
8.3.1	Torsogelenk I.....	208
8.4	Oberkörper.....	209
8.4.1	Oberkörper I	209
8.4.2	Oberkörper II	210
8.5	Gesamtsystem humanoider Roboter ARMAR III.....	210
8.6	Zusammenfassung	211
9	Zusammenfassung und Ausblick	212
9.1	Zusammenfassung	212
9.2	Ausblick.....	214
10	Literaturverzeichnis.....	217
11	Anhang.....	226
11.1	Three laws of robotics.....	226
11.2	Klassen der Systemelemente im Antriebsstrang.....	227
11.3	Systemelemente im Arm III.....	234
11.4	Glossar.....	236

1 Einleitung

Roboter üben auf den Menschen durch ihre für Maschinen ungewöhnliche Eigenständigkeit eine starke Faszination aus. Ein Teil der zukünftigen Robotersysteme wird in enger Kooperation mit dem Menschen arbeiten und dabei keine fest programmierten Tätigkeiten ausführen. Durch diese Eigenständigkeit besteht ein großes Potential dafür, dass kommende Roboter einen bedeutenden Einfluss auf das tägliche Leben der Menschen nehmen.

Der Begriff „Roboter“ wurde von dem tschechischen Schriftsteller Karel Čapek im Jahr 1921 in seinem Schauspiel „RUR“ (Rossum's Universal Robots) geprägt und bezeichnete einen Maschinenmenschen, der anstelle eines Menschen Tätigkeiten an einer Werkbank verrichtet. In dem aus dem Jahr 1950 stammenden Buch „I Robot“ beschreibt der Sciencefiction-Schriftsteller Isaac Asimov¹ humanoide Roboter, die sich in ihrem Äußeren und in ihrem Verhalten kaum von einem Menschen unterscheiden und sich in ihrer Entwicklung diesem immer weiter annähern. Am Ende bleibt die Frage offen, ob sich die Roboter eventuell sogar zum besseren Menschen entwickeln werden (Anhang Kapitel 11.1). Vor über einem halben Jahrhundert war Asimov mit dieser Fiktion den technischen Möglichkeiten weit voraus. In der Zwischenzeit haben sich die Grenzen des technisch Machbaren verschoben, so dass mittlerweile weltweit in vielen Projekten an Systemen humanoider Roboter geforscht wird. Diese Roboter verfügen über menschliche Merkmale, die das äußere Erscheinungsbild, die Kinematik und das interaktive multimodale Miteinander mit dem Menschen betreffen. Aufgrund dieser Merkmale interpretiert der Mensch intuitiv menschliche Züge in den Roboter. Diese Interpretation des Menschen ist Voraussetzung für einen humanoiden Roboter, für den keine einheitliche Definition existiert. Die bislang aufgebauten humanoiden Roboter sind noch weit von der Leistungsfähigkeit des Menschen entfernt. Ein Grund hierfür ist die Komplexität der Gesamtsysteme solcher Roboter, in denen die aktuellen Entwicklungen von unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen miteinander kombiniert sind. Diese Arbeit ist ein Beitrag dazu, die Komplexität solcher Systeme in der Entwicklung zu beherrschen.

Die komplexen Systeme humanoider Roboter bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten, bei denen es sich teilweise selbst um komplexe Systeme handelt, die in einem engen Bauraum miteinander kooperieren. In einem komplexen System sind

¹ Asimov 1950

viele unterschiedliche Teilsysteme integriert, die nicht in trivialer Weise miteinander interagieren². In den hier betrachteten Systemen sind Anteile aus den Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik, Softwaretechnik und Regelungstechnik enthalten. Solche Systeme werden unter dem Kunstwort „mechatronische Systeme“ zusammengefasst. Seit ihrem Aufkommen in den 70er Jahren haben mechatronische Systeme einen bedeutenden Stellenwert unter allgemeinen technischen Systemen erlangt. Hierbei handelt es sich zum einem um Systeme, die durch einen elektronischen Anteil eine zum Teil deutliche Funktionserweiterung des bereits bestehenden mechanischen Systems bewirken, wie es z.B. im KFZ bei ABS- oder ESP-Systemen der Fall ist, und zum anderen um Systeme, deren Existenz erst durch die Mechatronik ermöglicht wird, wie es z.B. bei humanoiden Robotern der Fall ist.

Im Stand der Technik ist eine große Anzahl von Möglichkeiten enthalten, wie die Teilsysteme von komplexen Systemen technisch aufgebaut werden können. Hieraus ergibt sich eine unübersichtliche Menge an Kombinationen, die eine potentielle Lösung für das Gesamtsystem darstellen. Oft sind zufällige Ideen der Ausgangspunkt für die technische Umsetzung eines komplexen Systems. Im Nachhinein sind dann die Fragen *„Warum ist das System so wie es ist?“* und *„Ist eine deutliche Verbesserung der Funktion durch eine kleine Veränderung am System zu erreichen?“* nicht mehr eindeutig zu beantworten. Daher ist in der Entwicklung ein methodisches Vorgehen notwendig, bei dem der Stand der Technik für die Teilsysteme und deren Kombinierbarkeit mitbeachtet wird.

An der Entwicklung von komplexen mechatronischen Systemen sind Vertreter aller Domänen beteiligt. Für eine zielgerichtete Entwicklung ist es notwendig, dass diese Fachleute den domänenspezifischen Anteil, für den sie der Spezialist sind, und das Gesamtkonzept des Systems in Koordination mit den Fachleuten der anderen Domänen berücksichtigen. Um diesen Prozess effizient durchführen zu können, ist ein strukturiertes Vorgehen notwendig. Es existieren verschiedene Vorgehensmodelle und Methoden für die Entwicklung von mechatronischen Systemen, die allgemeingültige Zusammenhänge identifizieren. Aufgrund der großen Unterschiede, die zwischen den unterschiedlichen mechatronischen Systemen bestehen, sind die Entwicklungsmethoden auf abstraktem Niveau gehalten. Zwischen den Teilsystemen komplexer mechatronischer Systeme bestehen ausgeprägte Wechselwirkungen, denen Rechnung getragen werden muss, um Iterationen im Entwicklungsprozess zu vermeiden. Mit abstrakten Entwicklungsmethoden ist dies nur bedingt möglich. Die Effizienz im Entwicklungsprozess ist durch die Anwendung von Vorgehensmodellen zu

² Simon 1969 - S.145

steigern, die an die jeweiligen spezifischen Systemeigenschaften angepasst sind und dadurch einen Umgang mit den Wechselwirkungen ermöglichen. Ein solches Vorgehensmodell kann nicht für die Entwicklung von allgemeinen mechatronischen Systemen eingesetzt werden, sondern nur für solche, die über die gleiche Aufbausystematik verfügen, an die das Vorgehensmodell angepasst ist.

In dieser Arbeit wird ein Vorgehensmodell für die Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme beschrieben. Dies sind mechatronische Systeme, die sowohl räumlich, als auch funktional integriert sind. Die Teilsysteme, die in diesen Systemen enthalten sind, wirken sich nicht unbedingt aufeinander aus, verfügen aber alle über Wechselwirkungen zur Mechanik. Somit handelt es sich um maschinenbauzentrierte multidisziplinäre Systeme. Aus diesem Grund betrachtet das hier beschriebene Vorgehensmodell den Prozess aus der Sichtweise des Maschinenbaus. Die Anforderungen der anderen Domänen werden über Randbedingungen bei der Entwicklung der mechanischen Komponenten mitbeachtet. Zentner bezeichnet diese Art des Vorgehens als „das Nutzen der Methoden einer dominierenden Domäne“³. Die Anforderungen der anderen Domänen werden hierbei auf die Konzepte, die Begriffswelt und die Methoden der dominierenden Domäne abgebildet. D.h. es werden die Auswirkungen auf die dominierende Domäne und nicht die Phänomene selbst beschrieben.

Das hier beschriebene Vorgehensmodell wurde im Rahmen dieser Arbeit an die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen humanoider Roboter angepasst und durch die Entwicklung einer Reihe von Teilsystemen solcher Roboter verifiziert. Exemplarisch wird hier das Vorgehensmodell für die Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters eingesetzt. Dies beinhaltet eine Strukturierung des Gesamtsystems in handhabbare Teilsysteme und die Aufbereitung des Stands der Technik dieser Teilsysteme.

Eines der Ergebnisse aus der Anwendung dieses Vorgehensmodells ist der Oberkörper des humanoiden Roboters ARMAR III, der im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 588 „Lernende und kooperierende multimodale humanoide Roboter“ aufgebaut wurde⁴.

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) unterstützt.

³ Zentner et al. 2005

⁴ SFB588, Homepage des Sonderforschungsbereichs

1.1 Aufbau und Inhalt

Einige Systeme humanoider Roboter von internationalen Forschungsprojekten, und insbesondere deren Arme, werden im Stand der Technik in Kapitel 2 vorgestellt. Hiernach erfolgt eine Beschreibung der signifikanten Unterschiede zwischen den Armen von humanoiden Robotern und den Armen von Industrierobotern. Weiterhin werden im Stand der Technik Methoden und Vorgehensmodelle für die Entwicklung von allgemeinen und von mechatronischen Systemen beschrieben und deren Anwendbarkeit für hochintegrierte Systeme dargestellt.

Die Zielsetzung dieser Arbeit wird in Kapitel 3 formuliert.

Das zentrale Kapitel in dieser Arbeit ist das 4-te, indem ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen abgeleitet wird. Dies erfolgt mithilfe einer beispielhaften hierarchischen Unterteilung von Systemen humanoider Roboter in Teilsysteme und beschreibt ein Vorgehen, das sich an den Informationsflüssen orientiert, die zwischen den Entwicklungen der Teilsysteme verlaufen. Um einen durchgängigen Informationsfluss in der Entwicklung zu ermöglichen, wird in diesem Kapitel eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht die Wechselwirkungen im System zu beachten. Hiermit lassen sich Iterationen im Entwicklungsprozess verhindern.

Das beschriebene Vorgehensmodells wird im Folgenden an der Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters angewandt.

Die kleinsten Einheiten in der hier durchgeführten Unterteilung sind die Systemelemente. Als Vorarbeit für die Anwendung des Vorgehensmodells ist der Stand der Technik dieser Systemelemente in Klassifikationen abzulegen. Die Klassen gewähren Zugriff auf Eigenschaften der Systemelemente, die für eine Integration ausschlaggebend sind. Dies wird in Kapitel 5, für die mechanischen Systemelemente von humanoiden Robotern, dargestellt.

Im ersten Teil der Entwicklung des Roboterarms, der Konkretisierung des Zielsystems, werden die zu Beginn der Entwicklung lösungsneutralen Anforderungen in quantitative Anforderungen an das Gesamtsystem gewandelt. Dies ist im Kapitel 6 enthalten.

Der zweite und dritte Teil des Vorgehensmodells, der Systementwurf der Teilsysteme und der Systementwurf des Gesamtsystems, wird in Kapitel 7 am Roboterarm angewendet. Der zweite Teil besteht aus einer seriellen Entwicklung der Module des Arms, die sich in der hierarchischen Unterteilung ergeben haben, unter Beachtung der Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen der Module. Im dritten Teil werden die Module zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt. An diesem können nun die Komponenten angebracht werden, die nicht einzelnen Modulen zugeordnet sind.

In Kapitel 8 werden die Teilsysteme humanoider Roboter vorgestellt, die mithilfe des Vorgehensmodells im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind.

In Kapitel 9 wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf Wissensbereiche gegeben, die auf dieser Arbeit aufbauen und in denen weiterer Forschungsbedarf besteht.

2 Stand der Technik

2.1 Systeme humanoider Roboter

In diesem Kapitel ist eine Beschreibung der Arme von humanoiden Robotern und ein Vergleich dieser Arme mit denen von Industrierobotern enthalten. Dies ermöglicht es abzuschätzen, inwieweit bestehendes Wissen über solche Systeme für die methodische Entwicklung eines neuen Arms eines humanoiden Roboters genutzt werden kann.

2.1.1 Forschungsprojekte

An dem Themengebiet der humanoiden Robotik wird seit den 80er Jahren geforscht. Vorreiter waren japanische Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Mittlerweile existiert weltweit eine Vielzahl von Forschungsprojekten zu diesem Thema. Im Folgenden wird eine Auswahl von Systemen dieser Roboter vorgestellt⁵, mit besonderer Beachtung der Armsysteme.

Die Firma **Honda Motor Co.** hat von 1994 bis 1997 die drei Roboter **P1**, **P2** und **P3**⁶ entwickelt (Abbildung 2.1-1). Im Laufe dieser Entwicklungen wurden die Systeme menschlichen Körperabmessungen angeglichen. Der Roboter P2 ist 1,8 m groß und wiegt 210 kg, während P3 1,6 m groß ist und 130 kg wiegt.

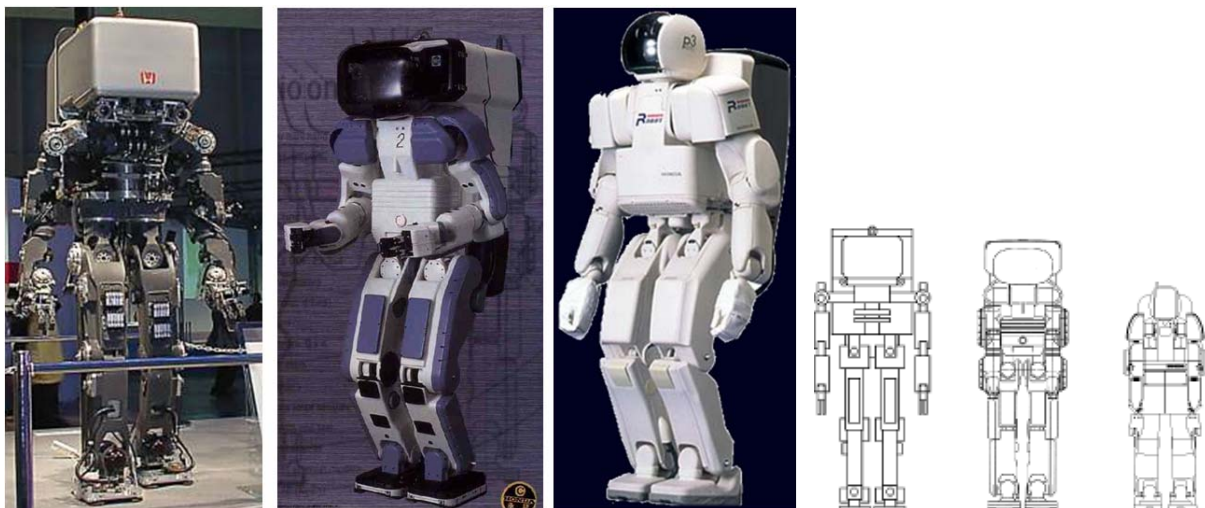


Abbildung 2.1-1: Roboter P1, P2 und P3 einzeln und im Größenvergleich

⁵ Suominen 2003

⁶ Hirai 1997 ; Hirai et al. 1998 ; Honda 2007

Diese signifikante Verringerung des Gesamtgewichts korreliert mit der Masse, die der Roboter mit der Hand halten kann: 2 kg von P3, im Gegensatz zu 5 kg von P2. Die Arme von P1, P2 und von P3 verfügen über 7 Freiheitsgrade (Abbildung 2.1-2). Drei Drehachsen in der Schulter (Roll, Pitch, Roll), eine Pitch-Drehachse im Ellbogen, im Unterarm eine Roll- und im Handgelenk eine Pitch- und eine Jaw-Drehachse (die Bezeichnungen Pitch, Yaw und Roll bezeichnen die Lage der Drehachsen zu einem Bezugssystem, siehe Abbildung 5.2-4). Angetrieben werden die Einzelgelenke im Arm mit Servomotoren, die direkt oder über eine Zahnriemenverbindung ein Harmonic-Drive-Getriebe antreiben, das mit der Welle des Gelenks verbunden ist. Ein zentrales Ziel der Firma Honda bei der Entwicklung von Robotern ist das zweibeinige Laufen. Parallel zur Weiterentwicklung der Gehbewegungen hat sich die Leistungsfähigkeit der Arme verringert, um Gewicht im Oberkörper einzusparen.

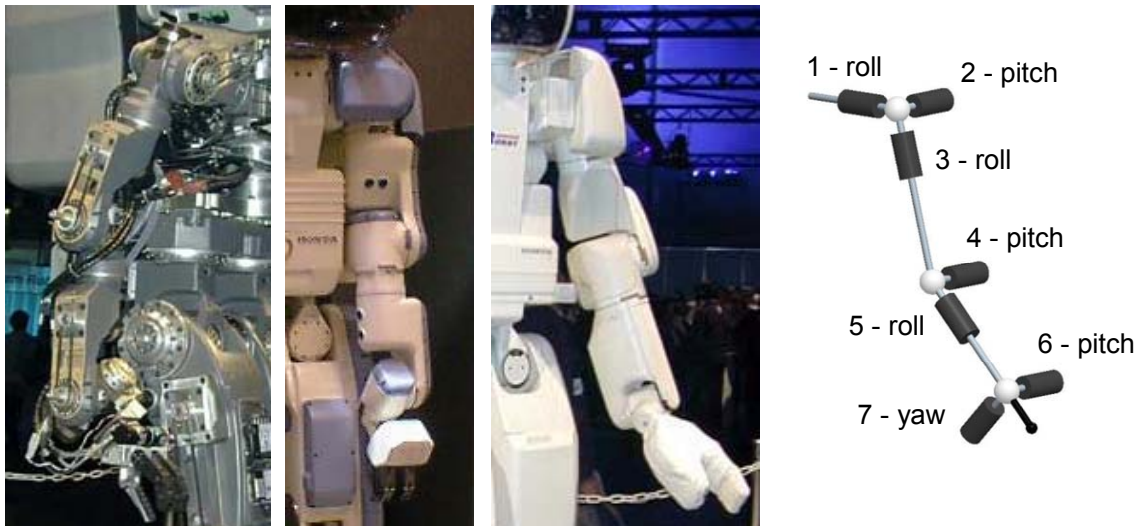


Abbildung 2.1-2: Arme der Roboter P1, P2 und P3 und Kinematik der drei Arme

Die erste Version des Roboters **ASIMO**⁷ (**A**dvanced **S**tep in **I**nnovative **M**Obility) ist eine Entwicklung, die 2000 aus den Projekten P1 bis P3 hervorgegangen ist (Abbildung 2.1-3, oben). Die maximale Masse, die ASIMO der ersten Version in der Hand halten kann, beträgt 0,5 kg. Der Roboter wiegt 52 kg, weist eine Körpergröße von 1,2 m auf und wurde speziell für das zweibeinige Gehen ausgelegt. Um Gewicht der Arme einzusparen, verfügen diese nur über 5 Freiheitsgrade. Auf die beiden Achsen im Handgelenk wurde verzichtet. Die verbleibende Kinematik ist für Armbewegungen zum Balancieren während des Laufens ausreichend. Ein Manipulieren von Gegenständen ist damit nur eingeschränkt möglich. Der Roboter ASIMO wurde in mehreren Generationen weiterentwickelt, wobei beispielsweise die Integration der Systemkomponenten verbessert wurde.

⁷ Honda 2007

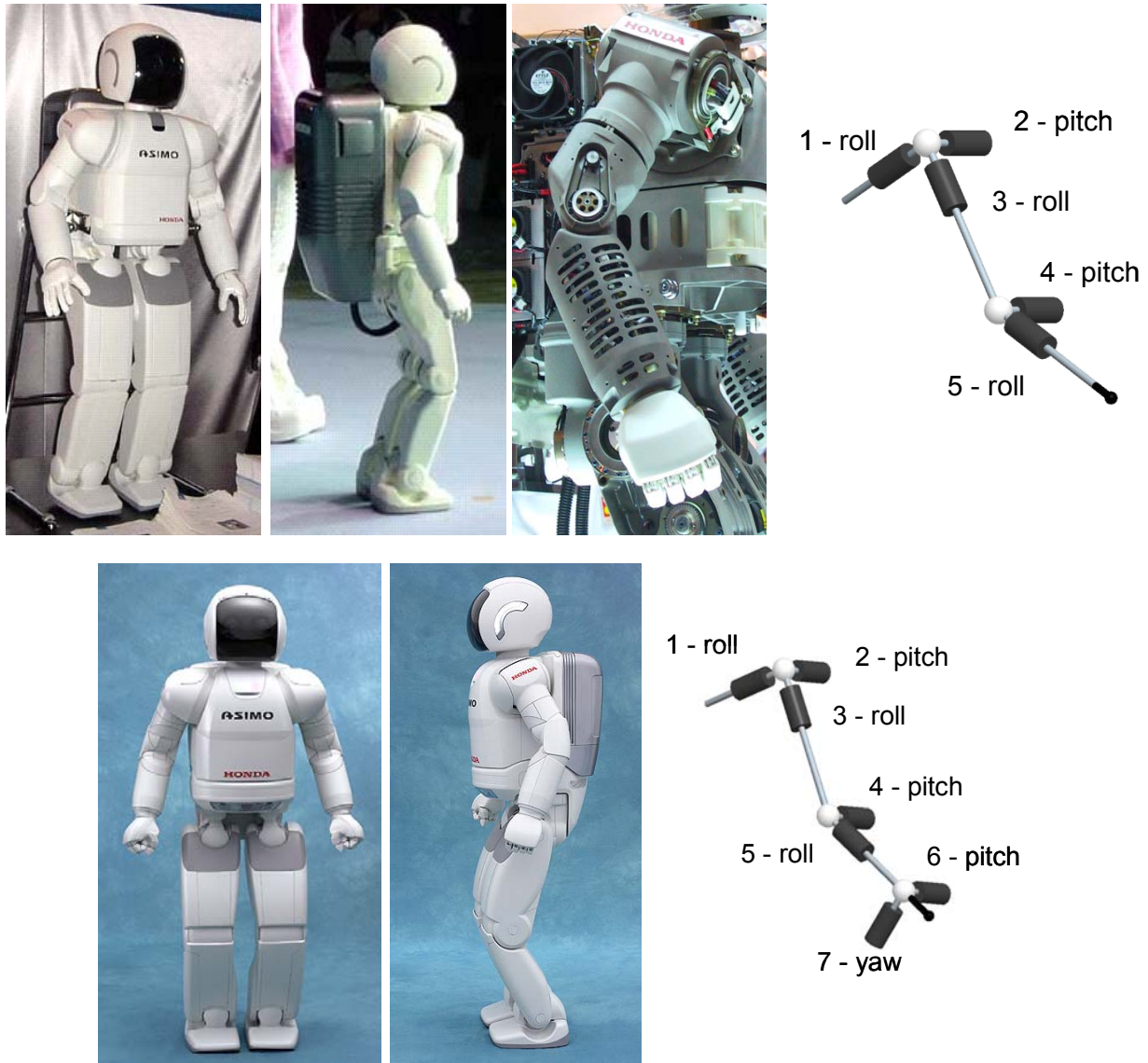


Abbildung 2.1-3: Roboter ASIMO in jeweils zwei Ansichten, oben erste Version und unten neueste Version, jeweils mit der Darstellung der Drehachsen des Arms

Dies hatte zur Folge, dass der Rucksack für Elektronik und Batterien am Rücken des Roboters deutlich verkleinert wurde. Das neueste Modell aus dem Jahr 2005 erreicht eine Gehgeschwindigkeit von 6,0 km/h und befindet sich damit am Übergang vom Gehen zum Laufen. Ausgleichsbewegungen mit der Hüfte ermöglichen dem Roboter dynamische Gehbewegungen und ein flüssiges Gehen um eine Kurve. Die Gehbewegungen dieses Roboters wirken menschlich und stellen im Augenblick den „State of the Art“ dar. Die neueste Version von ASIMO verfügt im Handgelenk wieder über zwei Drehachsen. Die Tragstrukturen des Roboters werden, was in Abbildung 2.1-3 zu erkennen ist, von der Ummantelungsstruktur gebildet, die aus einem Magnesiumguss besteht. Solche Tragstrukturen bieten einen deutlichen Gewichtsvorteil gegenüber spanend bearbeiteten internen Tragstrukturen. In Tabelle 2.1-1 sind die Spezifikationen der verschiedenen Roboterprojekte der Firma Honda aufgelistet.

	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>ASIMO 2000</i>	<i>ASIMO 2005</i>	
Entwicklungsbeginn	1993	1996	1997	2000	2005	
Größe [mm]	1915	1820	1600	1200	1300	
Breite [mm]	k.A.	600	600	450	450	
Tiefe [mm]	k.A.	758	555	440	k.A.	
Gewicht inkl. Batterien [kg]	185	210	130	52	54	
Haltemasse/Hand [kg]	k.A.	5	2	0,5	0,5	
Arbeitszeit [min]	k.A.	15	25	k.A.	60	
Gehgeschwindigkeit [km/h]	k.A.	2,0	2,0	0~1,6	6	
Anzahl Freiheitsgrade [DoF]	Kameras	2x1		2x1		
	Hals			2	3	
	Torso					1
	2 xArm (Schulter- Ellbo.-Handgel.	$2 \times (3+2+2) = 2 \times 7$	$2 \times (3+2+2) = 2 \times 7$	$2 \times (3+2+2) = 2 \times 7$	$2 \times (3+2+0) = 2 \times 5$	$2 \times (3+2+2) = 2 \times 7$
	Hand	2×1	2×2	2×2	2×1	2×2
	Bein	2×6	2×6	2×6	2×6	2×6
	Gesamt	30	30	32	26	34

Tabelle 2.1-1: Spezifikationen der Roboter P1, P2, P3 und ASIMO

Im Rahmen des in Japan staatlich geförderten „**Humanoid Robot Projekt**“ (HRP)⁸, das 1998 begann, wurden verschiedene humanoide Roboter entwickelt und aufgebaut (Abbildung 2.1-4).



Abbildung 2.1-4: Die Roboter HRP-1, HRP-2 und HRP-3

Die Spezifikationen der drei Systeme sind in Tabelle 2.1-2 aufgeführt. Der Roboter **HRP-1S** wurde in einer Kooperation zwischen der Firma **Kawasaki Heavy Industries**, dem National Institute of **Advanced Industrial Science and Technology (AIST)** und der Firma **Honda** entwickelt. Bei diesem Roboter handelt es sich um eine Weiterent-

⁸ Hirukawa et al. 2003 ; Yokoi et al. 2001 ; Yokoi et al. 2003

wicklung des Roboters P3 von Honda. Zeitgleich wurde mit der Entwicklung des Roboters **HRP-2** von **Kawada Industries**, **AIST** und **Yaskawa Electric**⁹ begonnen.

		<i>HRP-1S</i>	<i>HRP-2P</i>	<i>HRP-3P</i>
Veröffentlichung		1998	1998	2005
Größe [mm]		1600	1539	1600
Breite [mm]		600	620	664
Tiefe [mm]			340	363
Gewicht inkl. Batterien [kg]		99 + 17	58	65
Gehgeschwindigkeit [km/h]			0-2	2,5
Anzahl Freiheitsgrade [DoF]	Hals	1	2	2
	Pan-Tilt-Einheit	1		
	Torso		2	2
	Arm (Schulter- Ellbo.-Handgel.)	2x(3+2+2) = 2 x 7	2x(3+2+1) = 2 x 6	2x(3+2+2) = 2 x 7
	Hand	2 x 1	2 x 1	2 x 3
	Bein	2 x 6	2 x 6	2 x 6
	Gesamt	30	30	36

Tabelle 2.1-2: Spezifikationen der Roboter HRP-1S, HRP-2P und HRP-3P

Dieser Roboter kann Bewegungen durchführen, an denen das gesamte System beteiligt ist, wie z.B. Tanzeinlagen, das Aufstehen aus einer Liegeposition oder das beidhändige Manövrieren von Gegenständen in einer engen Umgebung. Im Vergleich zu dem Vorgängermodell konnte das Gesamtgewicht um über 50% verringert werden. Die Batterien sind nicht mehr in einem großen Rucksack untergebracht, sondern konnten im Körper integriert werden. Die Anordnung der Drehachsen im Arm HRP-2 und -3 sind in Abbildung 2.1-5 dargestellt.

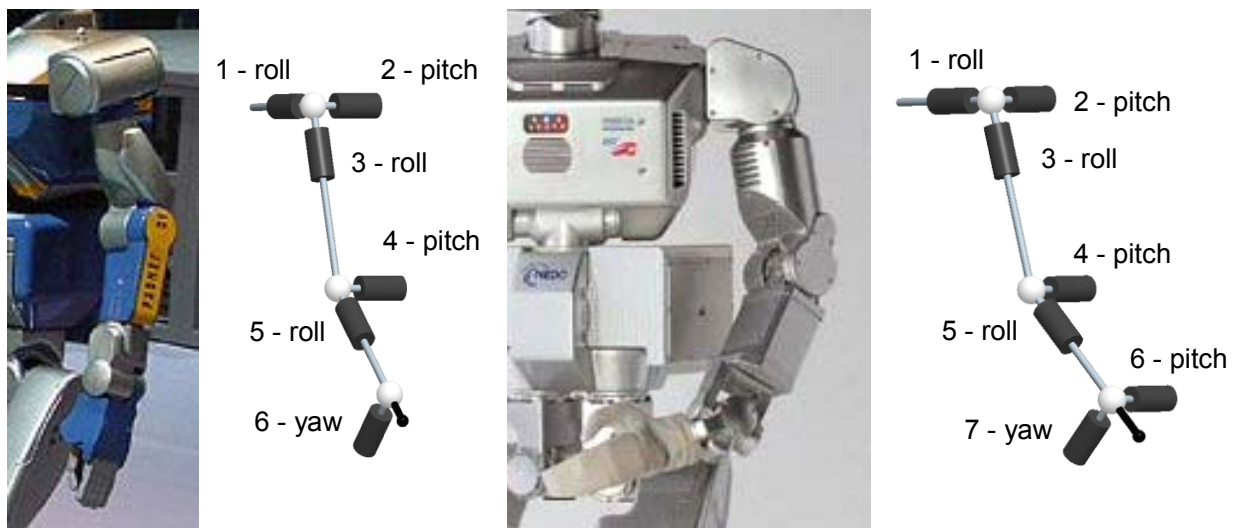


Abbildung 2.1-5: Arme von HRP-2 und HRP-3, jeweils mit der Darstellung der Kinematik

⁹ Kawada 2006

Das System dieses Roboters ist käuflich zu erwerben und wird von mehreren Instituten weltweit eingesetzt. Momentan, d.h. im Jahr 2007, wird der Roboter HRP-3P¹⁰ entwickelt. Dieses System ist nach außen hin abgedichtet, so dass es in einer feuchten und staubigen Umgebung agieren kann und nicht mehr nur in einem Labor. In das Handgelenk des Roboters **HRP-3** wurde im Vergleich zu HRP-2, der 6 Drehachsen im Arm aufweist, noch ein weiteres Gelenk integriert. Die Notwendigkeit für dieses zusätzliche Gelenk hat sich ergeben, um Gegenstände in einer engen Umgebung manövrieren zu können.

In einer Kooperation von **Kawada Industries mit der Universität Tokio** wurden die humanoiden Roboter **H6**, **H7** und **Isamu**¹¹ entwickelt (Abbildung 2.1-6).

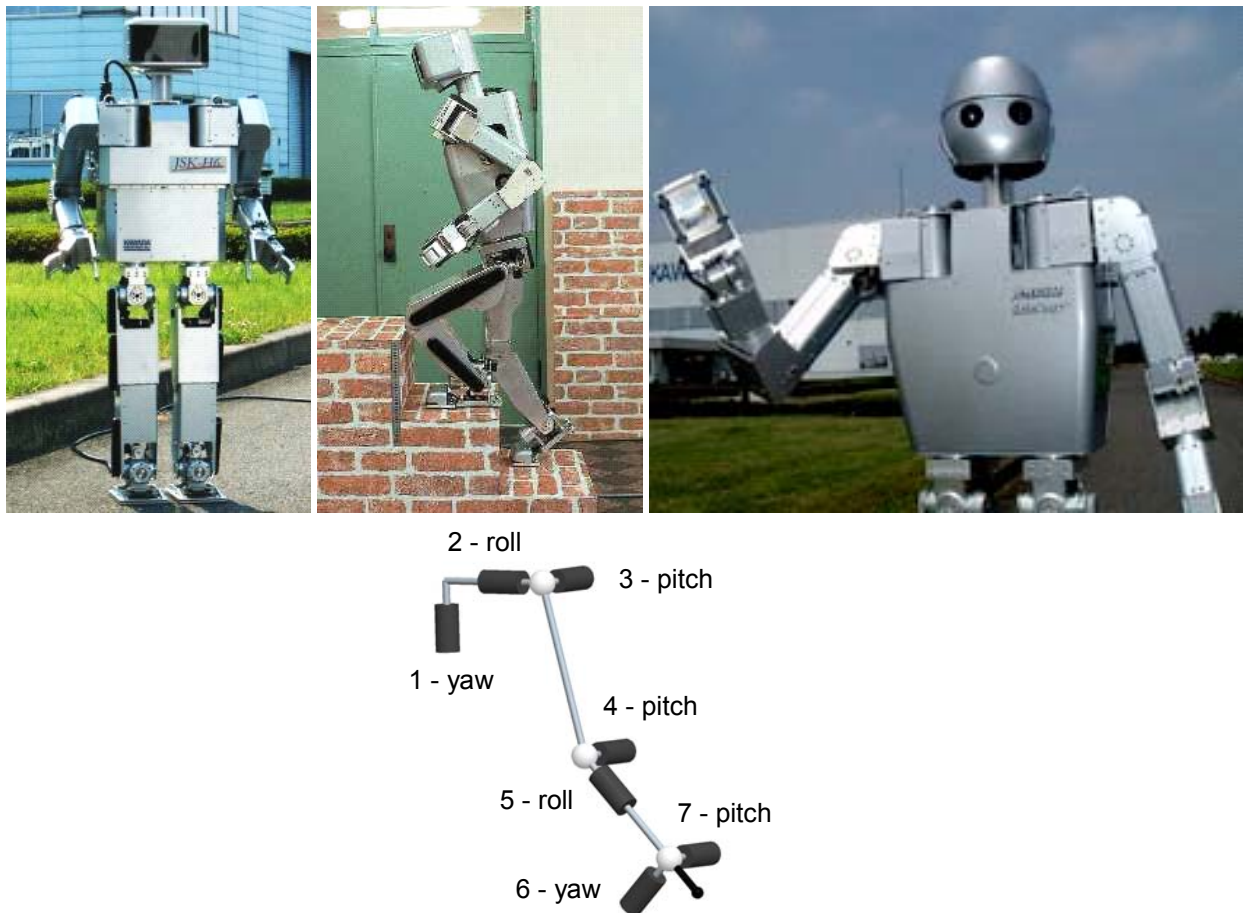


Abbildung 2.1-6: Humanoider Roboter H6, H7 und Isamu und die Kinematik der eingesetzten Arme

Die Bewegungen des Roboters H7 wurden über ein Motion Capture System, das über Kameras Bewegungen erfasst und reproduzierbar digital ablegt, von menschlichen Bewegungen abgeleitet. Die Arme der drei Roboter weisen große Ähnlichkeiten auf. Insgesamt wirken die Bewegungen dieser Roboter unharmonisch und lösen Schwin-

¹⁰ AKACHI et al 2005

¹¹ Kagami et al. 2001 ; Nishiwaki et al. 2000 ; Kagami et al. 2003

gungen im gesamten Roboterkörper aus. Angetrieben werden alle Gelenke von Servomotoren. Eine Drehzahl- und Momentenübersetzung erfolgt mit Harmonic-Drive-Getrieben. Informationen über diese Roboterprojekte stehen kaum zu Verfügung (Tabelle 2.1-3, Spezifikationen von H6, H7 und Isamu).

		H6	H7	Isamu
Veröffentlichung		2000	2001	2001
Größe [mm]		1370	1468	1500
Breite [mm]		590	604	
Gewicht inkl. Batterien [kg]		58	55	55
Gehgeschwindigkeit [km/h]				2,0
Anzahl Freiheitsgrade [DoF]	Augen	3		
	Hals	2	2	2
	Arm (Schulter- Ellbo.-Handgel.)	2 x (3+2+2) = 2 x 7	2 x (3+2+2) = 2 x 7	2 x (3+2+2) = 2 x 7
	Hand	2 x 1	2x1	2 x 1
	Bein	2 x 6	2x6	2 x 6
	Zehen	2x1	2x1	2 x 1
	Gesamt	35	30	32

Tabelle 2.1-3: Spezifikationen des Roboters H6, H7 und Isamu

Das **Kawato Dynamic Brain Project** ist ein Forschungsprogramm der **ATR Laboratories** in Kyoto und der **University of Southern California** in Los Angeles. Der humanoide Roboter **Dynamic Brain** (Abbildung 2.1-7) wurde im Rahmen dieses Projektes von der Firma **Sarcos**¹² aufgebaut.

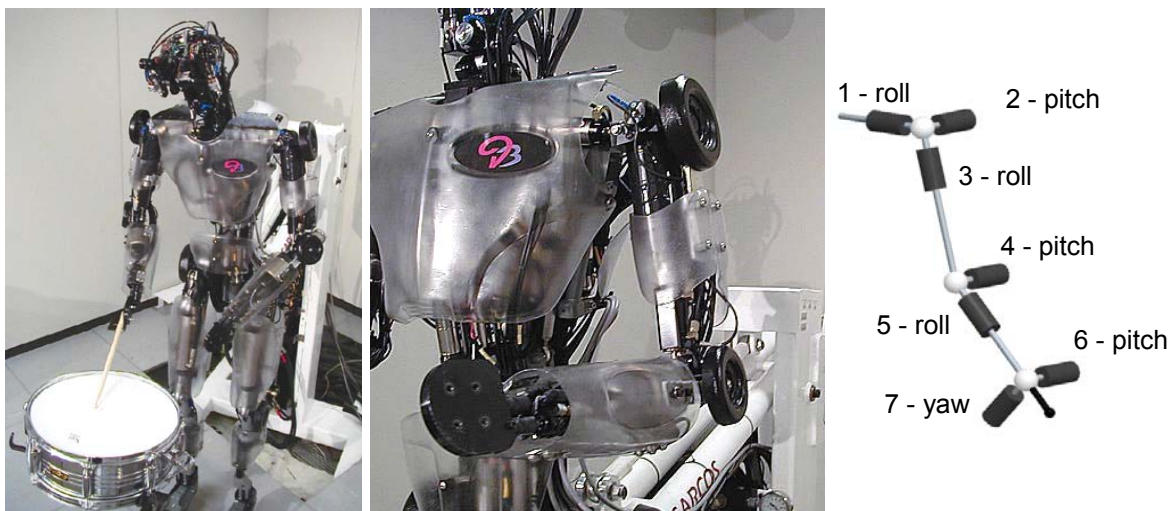


Abbildung 2.1-7: Der Roboter Dynamic Brain; Nahaufnahme vom Arm und dessen Kinematik

Die Bewegungen des Roboters wirken flüssig und natürlich. Dies ist unter anderem durch die Elastizität begründet, die in den hydraulischen Muskeln enthalten ist. Die Spezifikationen dieses Roboters sind in Tabelle 2.1-4 aufgelistet. Der zweibeinige

¹² Sarcos 2007

Roboter besitzt insgesamt 30 Freiheitsgrade. Er wird mit hydraulischen Aktoren betrieben. Der Roboter ist auf der Rückseite mit der Hüfte an einem Gestänge befestigt, über das die Druckversorgung erfolgt. Der Roboter ist nicht mobil und kann auch nicht auf den Beinen stehen, die von seiner Hüfte herabhängen. Der Schwerpunkt dieses Projektes liegt im Erforschen von computerbasierten Lernprozessen und der Steuerung komplexer Bewegungen, wie dem Fangen von geworfenen Gegenständen. Bewegungen soll der Roboter durch das Nachahmen von Demonstrationen erlernen, die er visuell registriert.

		<i>Dynamic Brain</i>
Größe [mm]		ca. 1850
Breite [mm]		540
Gewicht [kg]		ca. 80
Anzahl Freiheitsgrade [DoF]	Torso	3
	Bein	3 (x2)
	2 x Arm (Schulter-Ellbo.-Handgel.)	$2 \times (3+2+2) = 2 \times 7$
	Hals	3
	Augen	2 (x2)
	Gesamt	30
Art der Aktoren		Hydraulische Aktoren
Anzahl Linearaktoren		25
Anzahl Rotationsaktoren		5

Tabelle 2.1-4: Spezifikationen des Roboters Dynamic Brain

Das **Korea Institute of Science and Technology (KAIST)**¹³ beschäftigt sich mit dem zweibeinigen Laufen. Als Demonstratoren wurden die vier Robotersysteme **KHR-0 bis 3** aufgebaut. KHR-0 ist eine reine Laufmaschine, ohne Oberkörper, während es sich bei den anderen um humanoide Roboter handelt (Abbildung 2.1-8). Ein wichtiges Themengebiet in diesem Forschungsprojekt sind die Zusammenhänge zwischen der Stabilität des Roboters, dessen natürlicher Frequenz und dessen Gewicht. Hieraus ergaben sich Vereinfachungen in der Bestimmung des Zero-Moment-Points (ZMP), dessen Lage für ein stabiles statisches Gehen zu bestimmen ist. Mit dem Roboter KHR-1 wurden mit Gehbewegungen, wie dem einbeinigen Aufstehen und dem Treppensteigen, Kenntnisse über Regelungsstrategien zur Stabilität gewonnen. Die daraus gewonnenen Erfahrungen sind in die nächste Generation des Roboters KHR-2 mit eingeflossen. Dieser Roboter verfügt über spielfreie Gelenke und bestimmt über 3-Achsen Kraft-/Momentenmessnaben die vom Boden auf den Knöchel und von der Hand auf das Handgelenk des Roboters übertragenen Reaktionskräfte.

¹³ Park et al. 2004, Park et al. 2005

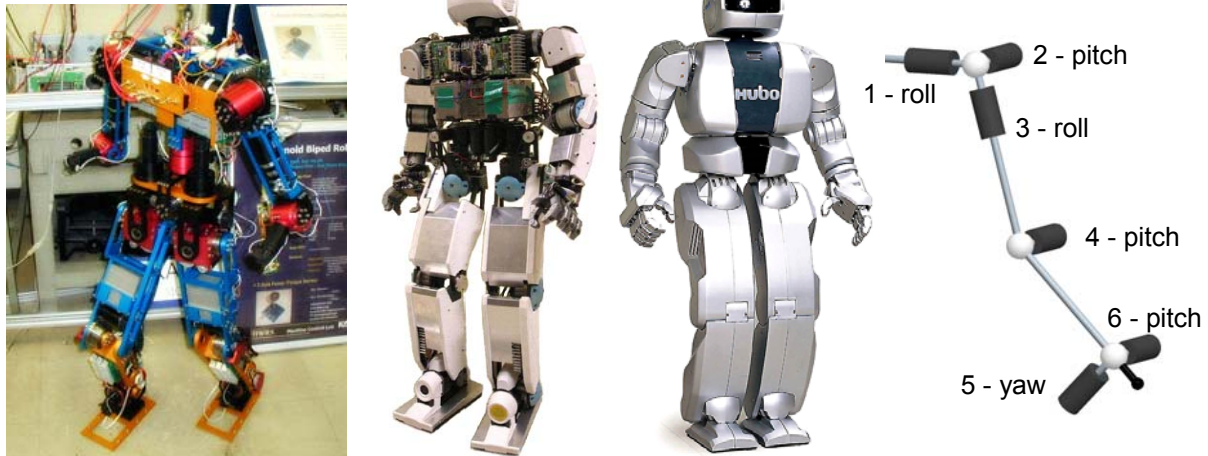


Abbildung 2.1-8: Die Roboter KHR-1, KHR-2 und KHR-3 (HUBO) und die Anordnung der Drehachsen im Arm von KHR-2 und 3

Der ein Jahr später aufgebaute Roboter **KHR-3**, der auch als **HUBO** bezeichnet wird, ist ähnlich zu KHR-2. Verbessert wurde die Steifigkeit der Gelenke und der Körpersegmente. Für Gelenke, bei denen ein geringes Spiel im Antriebsstrang akzeptabel ist, wie z.B. in den Antrieben der Finger, erfolgt die Übersetzung mit einem Planetengetriebe. Für Gelenke, die aufgrund der Stabilität spielfreie Antriebe benötigen, wie z.B. in den Gelenken der Beine, werden Harmonic-Drive-Getriebe und Zahnriemenübersetzungen eingesetzt. Die Spezifikationen der drei Roboter sind in der (Tabelle 2.1-5) aufgeführt.

		KHR-1	KHR-2	KHR-3 (HUBO)
Entwicklungsbeginn		2002	2003	2004
Größe [cm]		120	120	125
Gewicht [kg]		48	56	55 (inkl. Batterien)
Gehgeschwindigkeit [km/h]			1,0	1,3
Getriebe			Harmonic-Drive-Getriebe	Harmonic-Drive-Getri., Zahnrie., Planetenge.
Sensoren			3 Achsen-Kraft-Momentens. am Fuß	3 Achsen-Kraft-Momentens. am Fuß
Anzahl Freiheitsgrade [DoF]	Pan-Tilt-Einheit		2x2	2x2
	Hals		2	2
	Torso	1	1	1
	Arm (Schulter +Ellb.+Handgel.)	$2 \times (3+1)$ $= 2 \times 4$	$2 \times (3+1+2)$ $= 2 \times 6$	$2 \times (3+1+2)$ $= 2 \times 6$
	Hand	2×1	2×5	2×5
	Bein	2×6	2×6	2×6
	Gesamt	21	41	41

Tabelle 2.1-5: Spezifikationen der Roboter KHR-1, KHR-2 und KHR-3 (HUBO)

Der Roboter **Robonaut¹⁴** wird von der **NASA** unter der Beteiligung der **DARPA** (**Defence Advanced Research Projects Agency**) am Johnson Space Center in Houston, Texas entwickelt. Robonaut besteht aus einem Oberkörper, der auf einem Standbein montiert ist, das am jeweiligen Einsatzort befestigt wird (Abbildung 2.1-9). Da Weltraumspaziergänge ein erhöhtes Risiko für den Astronauten bedeuten, soll der Roboter diese zukünftig übernehmen und dabei zum Beispiel Reparaturen mit einer hohen Genauigkeit durchführen können. Der Roboter soll die Werkzeuge der Astronauten benutzen können, so dass für ihn keine zusätzlichen mittransportiert werden müssen. Um dies zu ermöglichen, besitzt der Oberkörper von Robonaut menschliche Abmessungen und eine menschenähnliche Verteilung der Freiheitsgrade. Die Gelenke des Roboters sind modular aufgebaut und nach außen hin mit einer durchgehenden Verkleidung gekapselt. Robonaut soll in der Schwerelosigkeit außerhalb eines Raumschiffs eingesetzt werden. Für die großen Temperaturunterschiede, denen der Roboter im Betrieb ausgesetzt ist, müssen die Mechanik und die Elektronik ausgelegt sein.

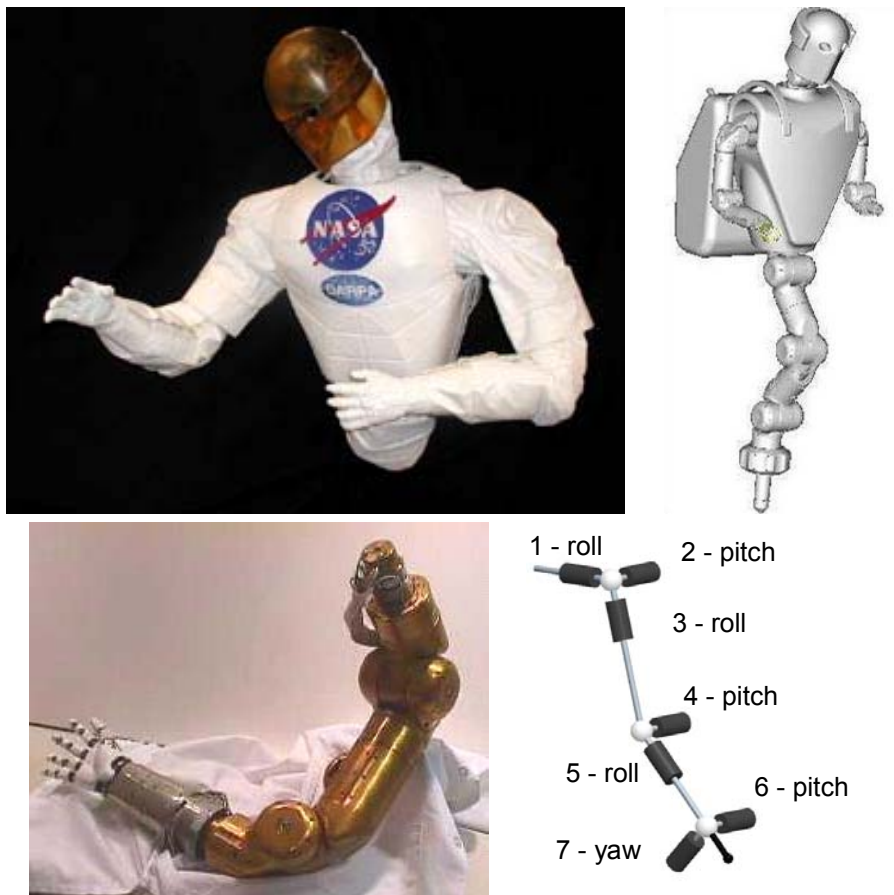


Abbildung 2.1-9: Oberkörper des Roboters Robonaut, Ganzkörpermodell und einzelner Arm mit dessen Kinematik

¹⁴ Robonaut 2007

Der Roboter kann in verschiedenen Modi betrieben werden. So soll er zum einen Aufgaben selbstständig und zum anderen komplett oder zum Teil ferngesteuert durchführen. Die Person, die ihn fernsteuert, soll ein direktes Feedback von den ausgeübten Kräften erhalten. (Tabelle 2.1-6, Spezifikationen von Robonaut).

		Robonaut
Veröffentlichung		1999
Größe [mm]		ca. 1850
Breite [mm]		540
Gewicht [kg]		ca. 80
Anzahl Freiheitsgrade [DoF]	Torso	2
	Arm	7 (x2)
	Schulter	3
	Ellbogen	2
	Handgelenk	2
	Hand	12
	Hals	2
	Augen	2 (x2)
	Gesamt	30

Tabelle 2.1-6: Spezifikationen von Robonaut

Am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt DLR wurden drei Generationen von Leichtbau Roboterarmen LWR (Light-Weight Robots)¹⁵ aufgebaut (Abbildung 2.1-10).

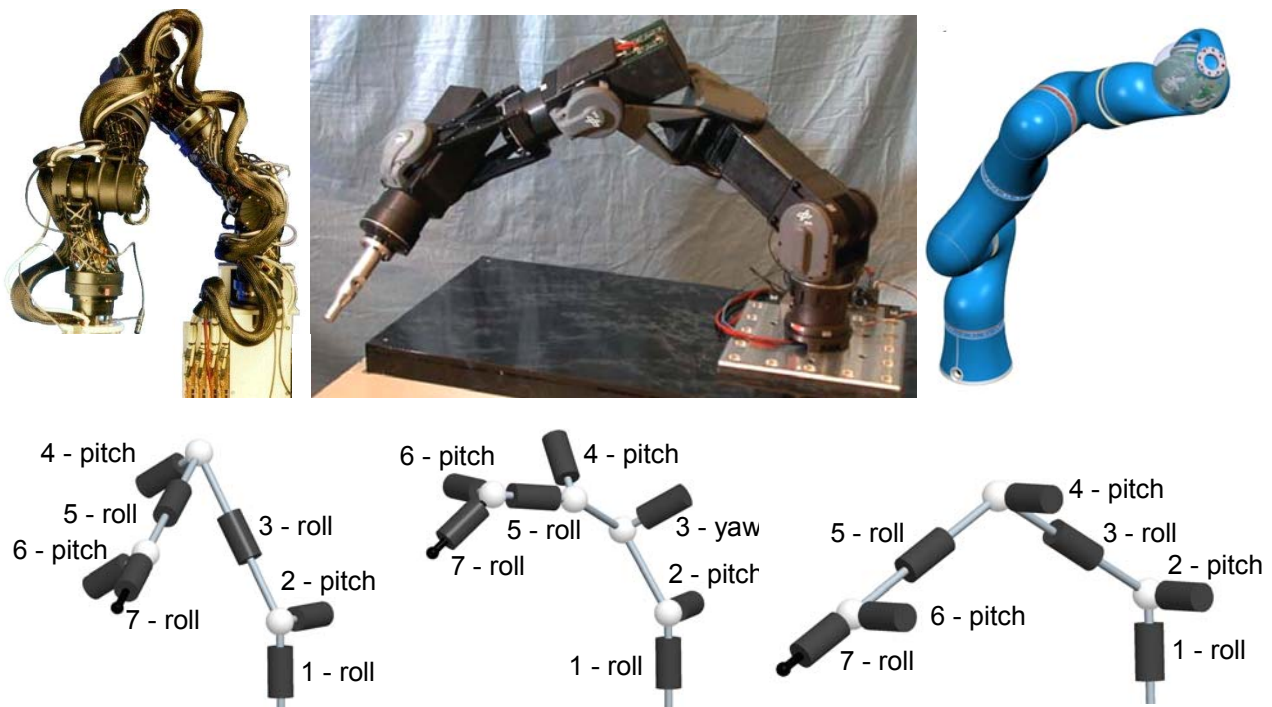


Abbildung 2.1-10: Fotos und Anordnung der Drehachsen der Leichtbauroboterarme LWR I bis III

¹⁵ Hirzinger et al. 2000 ; Hirzinger et al. 2001 ; Hirzinger 2007 ; Hirzinger et al. 2002

Diese Roboterarme sind modular aufgebaut und weisen daher kein humanoides Äußeres auf. Sie besitzen 7 Drehachsen und verfügen über eine im Vergleich zu anderen Roboterarmen sehr große Leistungsfähigkeit, insbesondere in Bezug auf den Antrieb und die Sensorik im Verhältnis zum Gewicht. Die Bewegungen dieser Roboterarme entsprechen aufgrund ihrer Exaktheit denen von Industrierobotern. Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines Roboterarms für die Raumfahrt, mit integrierter Elektronik, der positions- und kraftgeregelt betrieben werden kann. Im Laufe der Entwicklung erfolgte eine deutliche Integration des Gesamtsystems und eine Vereinheitlichung der Module im seriellen Mehrkörpersystem. Die Anordnung der Drehachsen entspricht beim neuesten Arm und dem Arm der ersten Version der Kinematik des menschlichen Arms, unterhalb des Schultergürtels, was in Abbildung 2.1-10 zu erkennen ist. Ein Unterschied besteht im Gelenk 7, bei dem es sich um ein fluchtendes Gelenk handelt und nicht wie beim Menschen um ein nicht fluchtendes. Daher ist für ein seitliches Beugen des Roboterhandgelenks eine Umorientierung des Unterarms notwendig. Durch eine spezifische Anpassung der Komponenten im Arm konnte in der neuesten Variante ein 1:1 Verhältnis zwischen Nutzlast und Eigengewicht erreicht werden. Dies wurde z.B. durch den Einsatz von speziellen Motoren ermöglicht, die auf ein großes Anfahrmoment ausgelegt sind und für das Hindurchführen eines Kabelkanals einen mittigen Durchgang aufweisen. In diesem Arm befinden sich in jedem Modul hochauflösende Momentensensoren, mit denen z.B. über eine Nullkraftregelung der Endeffektor auf einer Ebene oder einer Gerade kraftfrei von außen bewegt werden kann. Die Spezifikationen der drei Arme sind in Tabelle 2.1-7 aufgeführt.

	<i>LWR I</i>	<i>LWR II</i>	<i>LWR III</i>
Veröffentlichung	1992	1999	2002
Länge [m]	1,5	1,5	1,2
Anzahl Freiheits. [DoF]	7	7	7
Gewicht [kg]	18	17	13,5
Nutzlast [kg]	8	8	13,5
Sensoren	Gelenkwinkelsensor Momentensensor	Gelenkwinkelsensor Momentensensor Motorwinkelsensor	Gelenkwinkelsensor Momentensensor Motorwinkelsensor
Getriebe	Doppeltes Planetenge triebe	Harmonic-Drive- Getriebe	Harmonic-Drive- Getriebe
Material der Tragstruktur	Carbon-Fiberglas	Aluminium	Carbon-Fiberglas

Tabelle 2.1-7: Spezifikationen der Leichtbauroboterarme LWR I bis III

Um eine beidhändige Manipulation zu ermöglichen, wurden zwei LWR III Arme, an denen Hände mit 4 Fingern angebracht sind, mit einem Torso und einem Kopf zum

Roboteroperkörper **Justin**¹⁶ zusammengesetzt. Der Oberkörper ist auf einer 60 cm hohen Plattform angebracht, was ihm ermöglicht, den Boden und ein 2 m hohes Regal zu erreichen, was in Abbildung 2.1-11 mit CAD-Modellen dargestellt ist. Die Spezifikationen von Justin sind in Tabelle 2.1-8 aufgeführt.



Abbildung 2.1-11: Oberkörper des Roboters Justin

		<i>Justin</i>
Veröffentlichung		2006
Größe [mm]		900
Gewicht [kg]		ca. 45
Anzahl Freiheitsgrade [DOF]	Torso	3
	Arm	7 (x2)
	Hand	12 (x2)
	Kopf & Hals	2
	Gesamt	43

Tabelle 2.1-8: Spezifikationen von Justin

2.1.2 Unterschiede zwischen humanoiden Robotern und Industrierobotern

Zwischen humanoiden Robotern und Industrierobotern bestehen nicht nur in Bezug auf ihren Einsatzbereich, sondern auch in Bezug auf ihren Aufbau grundlegende Unterschiede. Gründe hierfür sind:

Industrieroboter sind ortsfest montiert und verrichten ihre Tätigkeiten ohne direkten Kontakt zum Menschen. In der Regel wird, um eine Gefährdung auszuschließen, durch eine Absperrung verhindert, dass Menschen in den Bewegungsraum der Roboter gelangen können. Der Roboter führt immer wiederkehrende fest vorgegebene Bewegungsabläufe durch. Ein Ziel in der Entwicklung von Industrierobotern ist eine

¹⁶ Ott et al. 2006

Erhöhung der Taktrate, mit der diese Tätigkeiten durchgeführt werden, bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Wiederholgenauigkeit¹⁷. Humanoide Roboter hingegen sind mobil und bewegen sich in Kooperation mit Menschen in deren Umgebung. Daher müssen sie spezielle Sicherheitsanforderungen erfüllen, damit von ihnen in keiner Situation eine Gefahr ausgeht. Sie führen keine fest vorgegebenen Bewegungen durch, sondern passen diese den sich ändernden Umgebungsverhältnissen an. Ein Ziel bei der Entwicklung von humanoiden Robotern ist eine Verbesserung der Handlungsfähigkeit in der menschlichen Umgebung, bei einer gleichzeitigen Verbesserung der kognitiven und kommunikativen Fähigkeiten.

Die Anordnung und die Anzahl der Gelenke von Industrierobotern ermöglicht es, jeden Punkt im Arbeitsraum mit einer eindeutigen Gelenkstellung zu erreichen. Aus diesem Grund verfügen Industrieroboter über maximal 6 Freiheitsgrade. An den Bewegungseinheiten dieser Roboter befinden sich rotatorische, translatorische oder zwangsgekoppelte Achsen. Hieraus lassen sich unter anderem seriell aufgebaute Roboterarme zusammensetzen, die einen kartesischen, einen zylindrischen oder einen kugelförmigen Arbeitsraum erschließen¹⁸. Wir beschränken uns hier auf die Betrachtung von seriellen Roboterarmen. Bei den Armen vieler humanoider Roboter handelt es sich um redundante Mehrkörpersysteme mit mehr als 6 Freiheitsgraden. Dies ermöglicht es, viele Punkte im Arbeitsraum auf beliebig viele verschiedene Weisen zu erreichen. Diese zusätzliche Beweglichkeit ist in der menschlichen Umgebung notwendig, da sich oftmals Hindernisse im Arbeitsraum befinden, die der Roboter umgreifen muss, und um Bewegungen durchzuführen, die denen des Menschen ähneln. Die Arme humanoider Roboter weisen eine serielle Kinematik auf, in der ausschließlich rotatorische Achsen eingesetzt werden. Der Bewegungsraum des Arms entspricht in der Regel dem Teil einer Kugel.

Die Parameter, anhand deren Industrieroboter bewertet werden, beziehen sich auf geometrische Kenngrößen, wie dem Arbeitsraum, den der Roboter mit seinem Greifpunkt (**T**ool **C**enter **P**oint – **TCP**) erreichen kann, und Belastungskenngrößen, die eine Aussage über die Werkzeuglast, die Gewichtskraft des Handhabungsobjektes und die Prozesskraft machen. Des Weiteren handelt es sich um kinematische Kenngrößen, die eine Aussage über die Zeiten machen, in denen bestimmte Bewegungszustände erreicht werden und mit welcher Taktrate Handlungen wiederholt durchführbar sind¹⁷. Eine Aussage über die Qualität, mit der eine Arbeitsmaschine ihre Arbeitsprozesse durchführen kann, erfolgt mit Genauigkeitskenngrößen.

¹⁷ VDI-Richtlinie 2861 , Blatt 2

¹⁸ Warnecke / Schraft 1990 - S.11

Genauigkeitskenngrößen geben an, mit welchen Abweichungen Punkte und Bahnen wiederholbar angefahren werden können. Die Parameter, anhand derer ein humanoider Roboter beurteilt wird, orientieren sich nur geringfügig an der Taktrate und der Genauigkeit, mit der Bewegungen wiederholt durchgeführt werden können. Entscheidend ist, wie gut sich der Roboter in sein Umfeld integriert. Hierfür sind wichtige Kriterien das statische und dynamische Erscheinungsbild des Roboters und seine mechanischen, sensomotorischen, kommunikativen und kognitiven Fähigkeiten. Die Körperproportionen des Roboters sollen ähnlich zu denen des Menschen sein und die Bewegungen sollen bei dem Betrachter einen menschlichen Eindruck hinterlassen. Die absolute Leistungsfähigkeit von Industrierobotern ist in Bezug auf die Belastungs-, und Genauigkeitskenngrößen und die Bewegungsgeschwindigkeiten deutlich größer als die von humanoiden Robotern.

Ein Vorgehen bei der Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Industrierobotern ist die Erhöhung der Taktrate, was durch eine Verbesserung der Dynamik und eine Erhöhung der Steifigkeit der Tragstruktur und des Antriebsstrangs zu erreichen ist. Dies geht oft mit einer Erhöhung der Masse der bewegten Teile und dem Einsatz von leistungsfähigeren Antriebssystemen einher. Dieses Vorgehen ist bei Industrierobotern möglich, da die Formen der Roboter außerhalb des Arbeitsraumes keinen grundlegenden Beschränkungen unterliegen. Hierin besteht der offensichtlichste Unterschied zu humanoiden Robotern, die in ihrem äußeren Erscheinungsbild menschlich wirken sollen und bei denen daher eine Verbesserung der Steifigkeit und der Dynamik nur über eine Optimierung der internen Struktur möglich ist. Daher werden große Anstrengungen unternommen, alle Komponenten des mechatronischen Systems mit einer hohen Leistungsdichte in dem begrenzten Bauraum zu integrieren. Dies geht einher mit einer Verringerung der Masse der bewegten Teile, für deren Bewegungen somit kleinere Antriebe benötigt werden.

2.1.3 Zusammenfassung

Weltweit existiert eine Reihe von Forschungsprojekten über humanoide Roboter, in denen mittlerweile eine größere Anzahl solcher Systeme entstanden ist. Diese können grob in Roboter unterteilt werden, die mit ihren Armen nur Gesten verrichten, und Roboter, die zusätzlich manipulative Handlungen ausüben. Bei den Robotersystemen, die sich auf einem hohen Entwicklungsniveau befinden, ist eine Vereinheitlichung insbesondere der mechanischen Konstruktion der Gelenke zu erkennen. Die Arme weisen bis zu 7 Freiheitsgrade auf (3 im Schultergelenk, 2 im Ellbogengelenk und 2 im Handgelenk). Angetrieben werden die Gelenke zumeist von Servomotoren, die über ein Harmonic-Drive-Getriebe und eventuell über einen Zahnriemen mit dem Gelenk verbunden sind. Solche Antriebe ermöglichen exakte Armbewegungen, führen aber zu Armen, bei denen die bewegten Teile unterhalb der Schulter, aufgrund der vielen

mitbewegten Teile, ein relativ hohes Eigengewicht aufweisen und ein großes Volumen benötigen. Die Arme von gehenden Robotern weisen in der Regel eine eingeschränkte Beweglichkeit und eine geringe Leistungsfähigkeit auf, um Gewicht im oberen Teil des Körpers einzusparen. Aus diesem Grund können diese Arme meist nur für Gesten genutzt werden. Existierende Roboter können, insbesondere mit ihren Armen, nur ein kleines Spektrum an manipulativen Tätigkeiten durchführen. Eine Kraft- bzw. Momentenmessung in den Armen erfolgt zumeist nicht über eine Bestimmung der antriebsseitigen Momente in jedem Gelenk, sondern über eine abtriebsseitige Bestimmung der von der Hand auf den Arm übertragenen Kräfte und Momente.

Aufgrund der grundlegenden Unterschiede zwischen den Zielsystemen von Industrierobotern und humanoiden Robotern orientiert sich die hier beschriebene Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters nicht an den Konzepten aktueller sehr leistungsfähiger Industrieroboter. Weiterhin existiert kein veröffentlichtes Wissen über eine methodische, effiziente und zielsystemgerechte Entwicklung der Systeme humanoider Roboter.

2.2 Vorgehensmodelle, Entwicklungsmethoden

Allgemeine Vorgehensweisen für die Entwicklung von Systemen werden mit Vorgehensmodellen bestimmt. Hierbei handelt es sich um Handlungsanweisungen, mit denen ein strukturiertes Vorgehen innerhalb von komplexen Prozessen beschrieben wird¹⁹. Diese werden in der Regel in Phasen unterteilt, für deren Bearbeitung Methoden oder wiederum Vorgehensmodelle bereitgestellt werden.

In komplexen Systemen ist eine große Anzahl von Teilsystemen enthalten, die sich zum Teil gegenseitig beeinflussen, was im Entwicklungsprozess zu beachten ist. Es existieren verschiedene Entwicklungsmethoden, die dem Entwickler einen Leitfaden für die Bearbeitung dieser Prozesse bereitstellen. Zum einen handelt es sich um Methoden, mit denen überschaubare Aufgaben standardisiert gelöst werden können, und zum anderen um Methoden oder auch Vorgehensmodelle, die sich mit dem gesamten Entwicklungsprozess beschäftigen. In diesem Kapitel werden Vorgehensmodelle vorgestellt, die den gesamten Prozess beschreiben.

2.2.1 Entwicklung allgemeiner Systeme

Die Entwicklung allgemeiner Systeme lässt sich unabhängig von ihrem Komplexitätsgrad durch einen integrierten Produktentstehungsprozess beschreiben, der sich durch die Fähigkeit einer flexiblen Anpassung an die jeweilige Entwicklungsaufgabe

¹⁹ Möhringer 2004

auszeichnet. Im Folgenden werden zwei Modelle für die Entwicklung von allgemeinen Systemen beschrieben, die solch eine flexible Anpassung ermöglichen.

Integrierte Produktentstehungsprozesse werden durch das **Integrierte Produktentstehung – Management Modell (IPEMM)** von Albers²⁰ beschrieben (Abbildung 2.2-1).

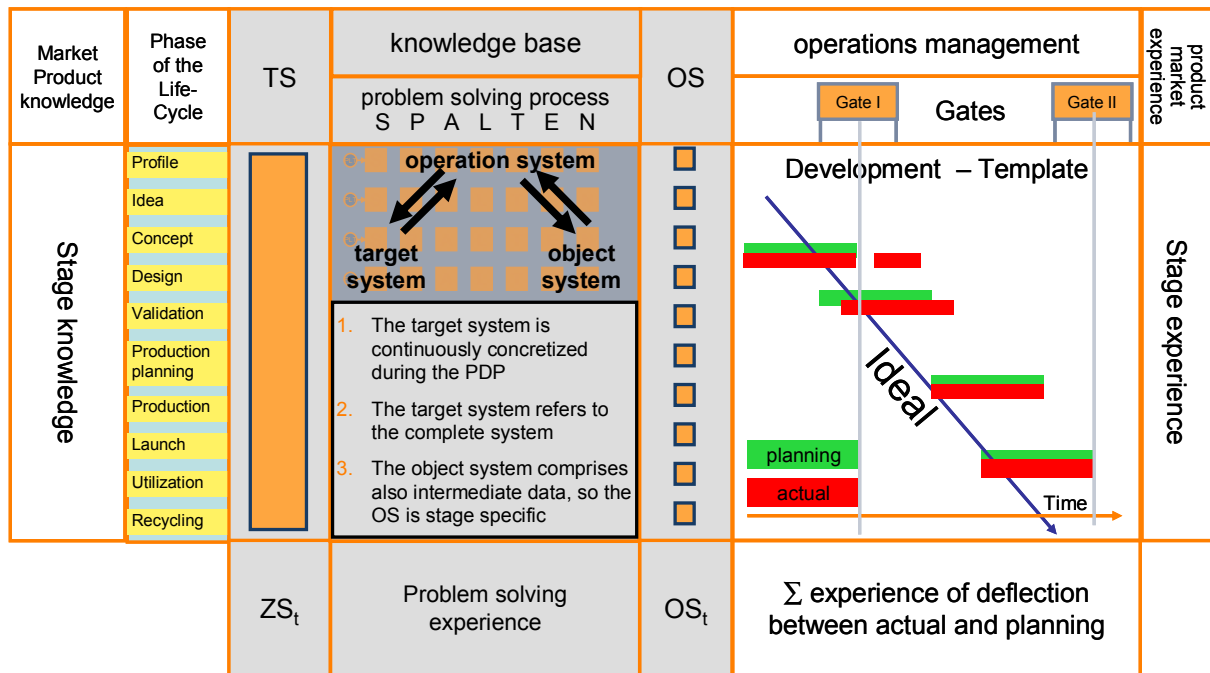


Abbildung 2.2-1: Integrierte Produktentstehung – Management Modell²⁰

Das IPEMM ermöglicht die Bestimmung von spezifischen Produktentstehungsprozessen unter Beachtung des gesamten Produktlebenszyklus, ausgehend von dem Erkennen eines Bedarfs - bis zum Recycling. Das IPEMM ist ein Meta-Prozess, der Entwicklungsprozesse für beliebige Systeme beschreibt. Im Handlungssystem findet eine zweidimensionale Bearbeitung des Prozesses statt. Dies erfolgt im Makro-Bereich entlang der Phasen des Produktentstehungsprozesses (PEP) und im Mikro-Bereich entlang der Phasen des Problemlösungsprozesses SPALTEN²¹. Der Produktentstehungsprozess ist in zehn Phasen aufgeteilt, die in ihrer Bearbeitung iterativ voneinander abhängen. Bei dem Prozess SPALTEN, der im Handlungssystem der Phasen eingesetzt wird, handelt es sich ebenfalls um einen Prozess auf einer Meta-Ebene, der sich in der Anwendung dem jeweiligen Problemfeld anpasst. SPALTEN ist ein Prozess, der durch den flexiblen an die Situation angepassten Einsatz von Werkzeugen ein aktuelles Zielsystem („Lösungsneutrale Beschreibung des Problems“) in ein Objektsystem („Problemlösung“) wandelt. In diesem Prozess

²⁰ Albers / Meboldt 2007a

²¹ Albers et al. 2002 ; Saak 2006

sind sieben Schritte enthalten (**S**ituationsanalyse, **P**roblemeingrenzung, **A**lternativen aufzeigen, **L**ösung auswählen, **T**ragweite analysieren (Chance und Risiko), **E**inführen und Umsetzen (Maßnahmen und Prozesse), **N**achbearbeitung und Lernen), die nacheinander bearbeitet und in denen systematisch Auswahlprozesse und Methoden eingesetzt werden. In den jeweiligen Phasen des SPALTEN-Prozesses erfolgt, je nach Bedarf, eine iterative Bearbeitung der Phasen des IPEMM (zweidimensionale Bearbeitung).

Insgesamt beschreibt der Prozess im Handlungssystem Elemente und deren Verknüpfungen, mit denen das Zielsystem spezifiziert und das Objektsystem erweitert wird. Es findet eine Fokussierung des Zielsystems statt („was will ich?“). Das Objektsystem stellt zu jedem Zeitpunkt im Prozess eine Lösung des Zielsystems dar („was habe ich?“). Das Zielsystem beschreibt hierbei alle relevanten Ziele und deren Abhängigkeiten und Randbedingungen, die für die Entwicklung der richtigen Lösung nötig sind, nicht jedoch die Lösung selbst. Im Laufe des Produktentstehungsprozesses wird das Zielsystem permanent erweitert (verändert) und konkretisiert. Jedem Zustand des Zielsystems (TS: **T**arget **S**ystem) sind **O**bjektsysteme (OS) zugeordnet (Abbildung 2.2-1), die dafür Lösungen darstellen²². Am Ende des Prozesses beschreibt das Zielsystem das Ergebnis der Entwicklung, das von einem Objektsystem erfüllt wird. Die anhand des IPEMM entworfenen Prozesse zeichnet eine flexible Anpassung an die jeweiligen Bedingungen aus, ohne Vorgabe eines standardisierten Vorgehens und ohne dass von den zu entwickelnden Systemen bestimmte Eigenschaften gefordert werden.

Im **Münchener Vorgehensmodell** (MVM)²³ von Lindemann ist ein Vorgehen für die Entwicklung von allgemeinen technischen Produkten enthalten, das der Situation angepasst werden kann. Ein solches flexibles Vorgehen ist notwendig, da im Rahmen der Produktentwicklung ein mehr oder weniger „genormtes“ Vorgehen nicht unbedingt zum Erfolg führen muss²³. Das MVM baut grundsätzlich auf den drei Hauptschritten der Problemlösung auf, die, wie es in der Realität in Prozessen zur Problemlösung häufig der Fall ist, sowohl sequentiell als auch iterativ zu durchlaufen sind.

- Ziel beziehungsweise Problem klären
- Lösungsalternativen generieren
- Entscheidung herbeiführen

²² Albers et al. 2006a

²³ Lindemann 2006

Das MVM enthält insgesamt sieben Schritte, die als Elemente bezeichnet werden. Die Reihenfolge, in der die Elemente abgearbeitet werden, ergibt sich aus der jeweiligen Situation.

- Ziel planen
- Ziel analysieren
- Problem strukturieren
- Lösungsidee ermitteln
- Eigenschaften ermitteln
- Entscheidung herbeiführen
- Zielerreichung absichern

In Abbildung 2.2-2 ist das MVM mit hervorgehobenen Standardvorgehen dargestellt.

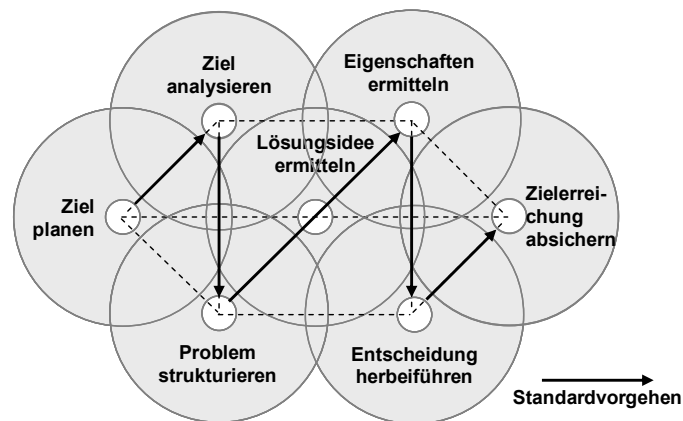


Abbildung 2.2-2: Münchner Vorgehensmodell mit Standardvorgehen bei der Produktentwicklung²³

Das Element „Ziel planen“ enthält eine Analyse der Situation sowie die Ableitung konkreter Maßnahmen, die von der Art des betrachteten Systems abhängen. Im Element „Ziel analysieren“ sind zur Klärung und Beschreibung des gewünschten Zielzustands konkrete und detaillierte Anforderungen an das Produkt zu formulieren. Das Element „Problem strukturieren“ dient der Ermittlung von Handlungsschwerpunkten und ermöglicht eine Fokussierung bei der anschließenden Lösungssuche. Hierfür ist das System auf einem abstrakten Niveau darzustellen, um die Komplexität für die Betrachtung zu reduzieren und das System in Teilsysteme zu zerlegen. Ziel ist, ein Problemmodell aufzubauen. Das Element „Lösungsideen ermitteln“ beschreibt die Suche nach vorhandenen und das Generieren von neuen Lösungen, die zu einer möglichst optimalen Gesamtlösung zu kombinieren sind. Im Element „Eigenschaften ermitteln“ ist eine Eigenschaftsanalyse des betrachteten Systems durchzuführen und die hierfür relevanten Merkmale zu bestimmen, um ein Erreichen des Ziels zu gewährleisten. Im Element „Entscheidung herbeiführen“ sind die Lösungsideen und -alternativen zu bewerten und eine Auswahl zu treffen. Das Element „Zielerreichung absichern“ mindert die Risiken bei der Umsetzung der Entscheidung.

In Abbildung 2.2-2 ist das Standardvorgehen bei der Problemlösung im Münchner Vorgehensmodell mit Pfeilen markiert. Dieses Vorgehen ist für die Entwicklung von komplexen Systemen durch eine Veränderung der Reihenfolge der Elemente und deren Ausprägung den jeweiligen Rahmenbedingungen der Situation anzupassen.

Bemerkung

Prozesse, die eine zielgerichtete Entwicklung von komplexen Systemen unterstützen, müssen an die spezifischen Systemeigenschaften angepasst sein und den internen Wechselwirkungen Rechnung tragen. Um den Aufbau eines solchen Prozesses mithilfe eines Meta-Modells zu ermöglichen, muss dieses Werkzeuge bereitstellen und deren strukturierte Anwendung ermöglichen. Dieses Vorgehen wird vom IPEMM unterstützt.

2.2.2 Entwicklung mechatronischer Systeme

Der Begriff Mechatronik beschreibt das integrative Zusammenwirken von Mechanik und Elektronik, um für bestehende mechanische Systeme eine Funktionserweiterung zu bewirken oder um Systeme zu generieren, die nur aufgrund ihrer mechatronischen Bestandteile Funktionen erfüllen können.

Die folgende Definition der Mechatronik bringt die ausgeprägte Integration der darin enthaltenen Wissensgebiete zum Ausdruck: *Mechatronik befasst sich mit technischen Systemen, die aus mechanischen, elektronischen/elektrischen und informationstechnischen Teilsystemen bestehen, welche durch intensive Wechselwirkungen gekennzeichnet sind und nicht mehr separat und disziplinentorientiert in unabhängigen Prozessen entwickelt werden können.*²⁴ In dieser Definition ist ebenfalls enthalten, dass bei einer Betrachtung von mechatronischen Produkten der Prozess für deren Entwicklung nicht außer Acht gelassen werden kann²⁵.

Die Entwicklung von mechatronischen Systemen ist häufig langwierig und damit kostenintensiv. Dies liegt zum einen an der Komplexität vieler dieser Systeme und zum anderen an den signifikanten Unterschieden, die zwischen den daran beteiligten Domänen bestehen, was die Kommunikation zwischen den Entwicklern deutlich beeinträchtigt. Daher ist es zielführend, die Entwicklung durch ein methodisches Vorgehensmodell zu unterstützen, das ein Ausschöpfen der Möglichkeiten der einzelnen Domänen unterstützt und diesen ein Zusammenspiel ermöglicht. Möhringer analysiert umfassend Entwicklungsmethoden für mechatronische Systeme²⁶. Er

²⁴ Albers 2002

²⁵ Isermann 1999

²⁶ Möhringer 2004

unterteilt sie in solche, die einen domänenspezifischen und in solche, die einen domänenübergreifenden Ansatz wählen.

Die **VDI-Richtlinie 2206**²⁷ ist eine Entwicklungsmethodik für allgemeine mechatronische Produkte. Das darin enthaltene Vorgehensmodell kann flexibel an die spezifischen Anforderungen der Entwicklung angepasst werden. Diese Richtlinie stützt sich im Wesentlichen auf drei Elemente. Dies sind der Problemlösungszyklus in der Mikroebene, das V-Modell im Makrozyklus und Arbeitsschritte, die sich oft wiederholen. Das erste Element, der Problemlösungszyklus (Abbildung 2.2-3, rechts), der aus dem „Systems Engineering“²⁸ stammt, ist ein allgemeines Denkschema zur Lösung von Problemen. Dieses wird in der VDI-Richtlinie als Standardvorgehen bei der Bearbeitung von Problemen in der Mikroebene angewandt. Zu Beginn findet darin die Bestimmung des Zielsystems bzw. die Konkretisierung eines vorhandenen Zielsystems statt. Im Rahmen einer Lösungs-Synthese- und Lösungs-Analyse-Schleife werden Lösungen generiert und dabei spezifiziert. Eine Analyse der Lösungen erfolgt im Anschluss und ermöglicht eine Entscheidung darüber herbeizuführen, ob das Ergebnis ausreichend ist, zu verbessern ist oder eine neue Lösung zu generieren ist. Eine Aneinanderreihung und Verschachtelung solcher Lösungszyklen, die für überschaubare Probleme eingesetzt werden, ermöglicht ein flexibles Anpassen an die jeweilige Entwicklungsaufgabe.

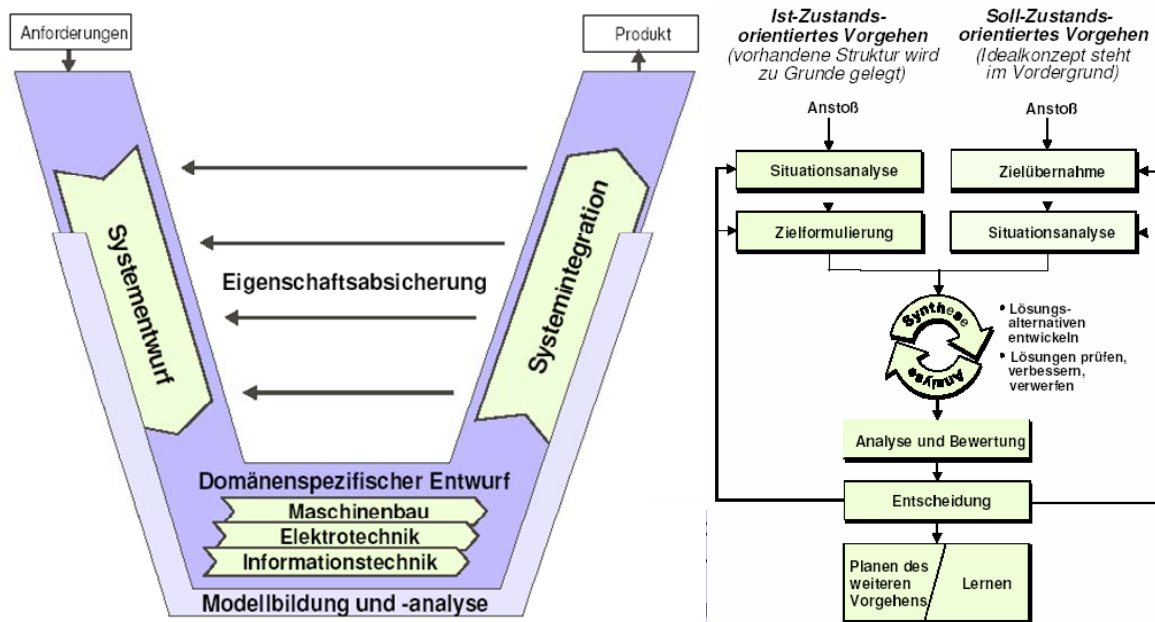


Abbildung 2.2-3: V-Modell aus der VDI 2206, mit dem darin integrierten Problemlösungszyklus aus dem Systems Engineering²⁹

²⁷ VDI-Richtlinie 2206 ; Gausemeier / Lückel 2000

²⁸ Daenzer / Huber 2002 - S.58

²⁹ VDI-Richtlinie 2206

Das zweite Element ist das als Makrozyklus eingesetzte V-Modell (Abbildung 2.2-3, links). Dieses stammt ursprünglich vom Bundesministerium des Inneren für die Planung und Durchführung von IT-Vorhaben³⁰ und wurde den Belangen mechatronischer Entwicklungen angepasst. Hierin sind die Bereiche Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf und Systemintegration hintereinander geschaltet. Im ersten Ast des V-Modells, dem Systementwurf, werden die Eigenschaften des Systems domänenübergreifend durch eine Zerlegung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen herausgearbeitet. Diese Teilfunktionen ergeben in ihrer Gesamtheit die in dieser Phase zu entwerfende Prinziplösung. In der Basis des V-Modells werden die Teilfunktionen den einzelnen Domänen zugeordnet und es findet ein domänenspezifischer Entwurf statt. Im rechten Ast des V-Modells, der Systemintegration, werden die Teilsysteme zusammengefügt, und es findet schrittweise ein Abgleich der Funktionen des Gesamtsystems mit dem im linken Ast herausgearbeiteten Zielsystem statt. Dieser Abgleich geht mit einer Integration in die Handlungsumgebung einher. Zur Unterstützung der Entwicklung findet während des gesamten Prozesses eine Darstellung und Analyse des Systems und von Teilen davon in Modellen statt. Das dritte Element der in der VDI 2206 beschriebenen Entwicklungsmethodik sind Arbeitsschritte, die in der Entwicklung immer wiederkehren und mit vordefinierten Prozessbausteinen bearbeitet werden. Hierbei handelt es sich um Prozessbausteine, die aus anderen Entwicklungen schon bekannt sind. Um einen höheren Reifegrad des zu entwickelten Systems zu erreichen, ist der Makrozyklus des V-Modells eventuell mehrfach zu durchlaufen (Abbildung 2.2-4).

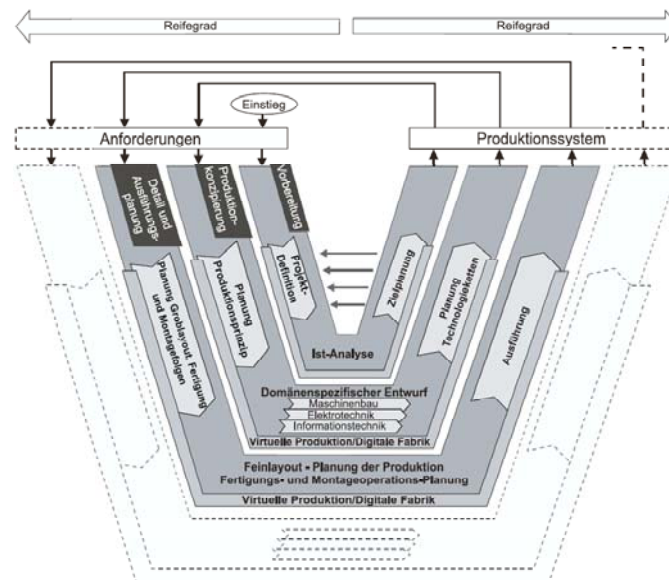


Abbildung 2.2-4: Iteratives Vorgehen beim Entwurf von Produktsystemen für mechatronische Erzeugnisse in der VDI-Richtlinie 2206²⁹

³⁰ Bundesministerium 1992

Hahn, Lückel und Wittler beschreiben mit **O²MEN³¹** (**O**bjekt-**O**rientierter **M**echatronischer **E**ntwurf) ein Vorgehensmodell für den Entwurf komplexer mechatronischer Systeme. Eine Organisation der am Entwicklungsprozess beteiligten Personen erfolgt über Anwendungsfälle (use cases), die aus der Methodik des objektorientierten Softwareentwurfs stammen³². Hiermit werden den „Objekten“ die Rollen zugeordnet, die sie im Prozess verrichten. D.h. hierdurch werden die Rollen des Systemarchitekten, des Konstrukteurs usw. im Entwicklungsprozess bestimmt. Ziel des Vorgehensmodells des Entwurfsprozesses ist es, ausgehend von den Anforderungen an das System, ein detailliertes physikalisch topologisches Gesamtmodell des Systems zu entwickeln. Der Entwicklungsprozess ist in die Teilprozesse Entwurfs-, Gestaltgebungs-, Test- und Komponentenentwicklungsprozess aufgeteilt (Abbildung 2.2-5). Die einzelnen Prozesse werden in weitere Unterprozesse aufgeteilt, in denen Modelle eine wichtige Rolle spielen. Modelle stellen zwischen den einzelnen Prozessen in der Entwicklung als Workflow die Kommunikationsform dar.

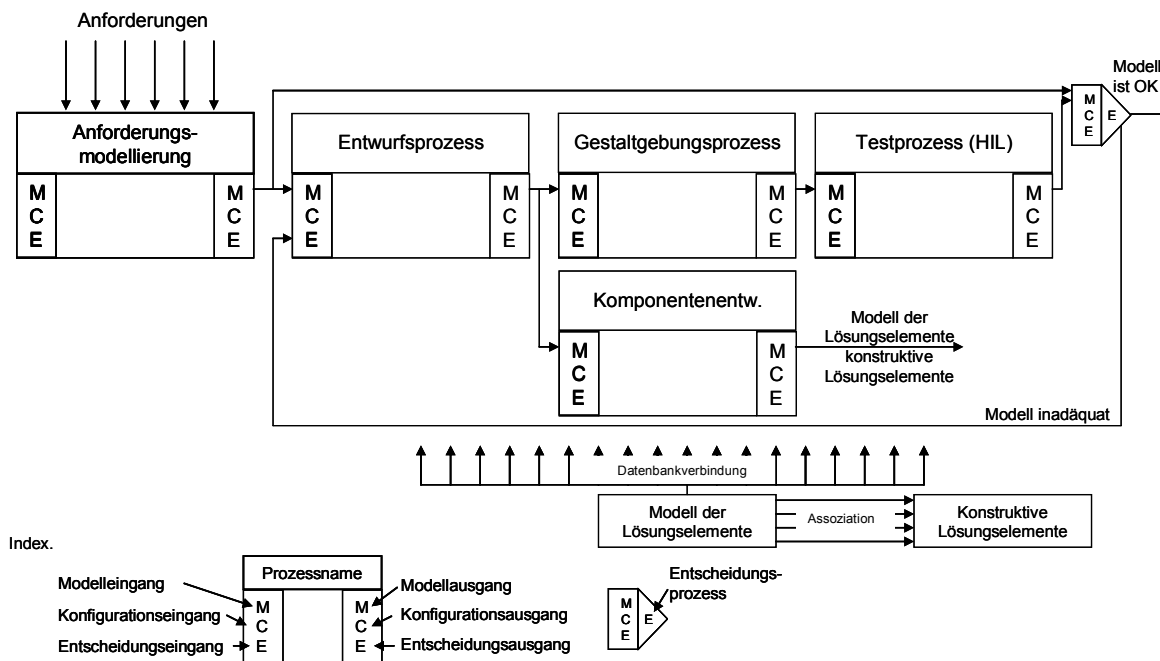


Abbildung 2.2-5: Gliederung des Entwicklungsprozesses im O²MEN³¹

Ein wesentlicher Prozess in O²MEN ist die Modellierung des Systems im Rechner. Die Modellbildung wird in drei wesentliche Teilmodellierungsprozesse aufgeteilt, die in der Entwicklung iterativ voneinander abhängig sind (Abbildung 2.2-6). Hierbei handelt es sich um die Abbildung der Kinematik in einem Modell, um die Funktionserfüllung sicher zu stellen, den Aufbau eines Modells, um die Dynamik des Systems abzubilden,

³¹ Hahn et al. 1997

³² Oestereich 2001

und letztendlich um ein Modell des mechatronischen Systems, mit dem die Gesamtfunktion sichergestellt wird.

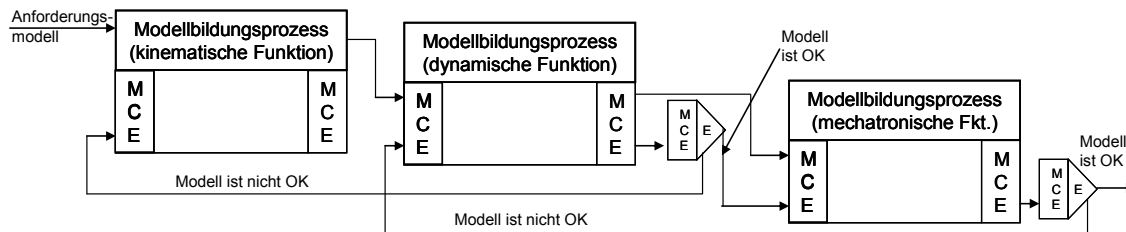


Abbildung 2.2-6: Workflow im Modellbildungsprozess im O²MEN³¹

Eine Methode für die Entwicklung von multitechnologischen Systemen, die kein starres Vorgehen in der Entwicklung propagiert, sondern dieses dem jeweiligen Szenario anpasst, ist das **Customization-Based Design (CBD)** von Baijun³³. Das zu entwickelnde multitechnologische System wird nicht aus den Fachgebieten Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik heraus betrachtet, sondern anhand der Systemeigenschaften Funktion, Struktur und Verhalten. Die Funktion stellt hierin die vom Entwickler vorgesehene Beziehung zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Systems dar. Die Struktur ist die physikalische Abbildung des technischen Objekts. Das Verhalten beschreibt welche Werte die Zustandsvariablen der Strukturkomponenten einnehmen müssen, um eine Funktion zu erfüllen. Das Verhalten eines physischen Systems wird von physikalischen Gesetzmäßigkeiten bestimmt und das Verhalten von Softwareprogrammen von mathematischen Algorithmen. Die drei Aspekte Funktion, Struktur und Verhalten eines technischen Systems werden in zwei Kategorien mit unterschiedlichen Methoden beleuchtet, um die Wirkprinzipien zur Erfüllung der Gesamtfunktion zu bestimmen.

Die Entwicklung ist in zwei Kategorien aufgeteilt. In der ersten Kategorie „A common platform“ werden die notwendigen Entwicklungstätigkeiten, die Struktur und die Funktionen des Systems domänenunabhängig dargestellt und analysiert (Abbildung 2.2-7 – oberer Teil). Nach Baijun geht die Entwicklung eines Systems mit dessen Darstellung einher. Er beschreibt Diagramme, in denen die Beziehungen, die zwischen den Systemelementen bestehen, mit einer objektorientierten Semantik dargestellt werden. Diese Diagramme stellen Beziehungsnetzwerke so dar, dass die zwischen den Teilsystemen und Systemelementen bestehenden Wechselwirkungen offensichtlich zu erkennen sind. Systemelemente, die Einzelfunktionen erfüllen, sind mithilfe von Konstruktionskatalogen in Baumstrukturen systematisch abzulegen. Um verschiedene Konzepte und Designvarianten zu generieren, ermöglichen es die Baumstrukturen als Wissensspeicher den gesamten Lösungsraum für alle System-

³³ Baijun 2004

elemente zu berücksichtigen. Zur Verifikation der so gefundenen Konstruktionen wird die Funktionskontrolle mit verschiedenen Verfahren beschrieben, beispielsweise durch die Modellierung von Bondgraphen³⁴.

In der zweiten Kategorie „A scenario-driven model“ (Abbildung 2.2-7 – unterer Teil) wird das Entwicklungsverfahren an das jeweilige Entwicklungs-Szenario angepasst.

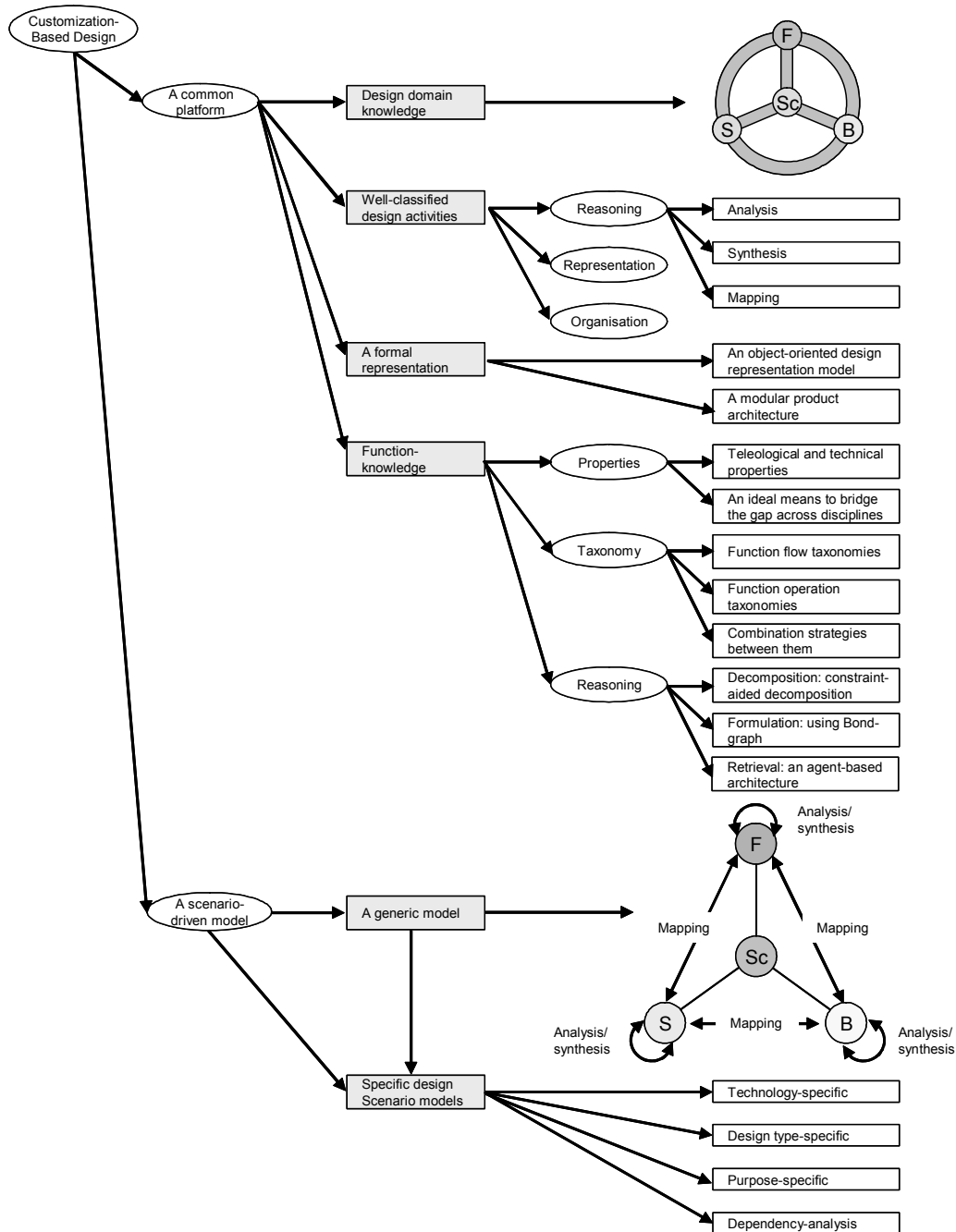


Abbildung 2.2-7: The common platform and the scenario-driven model in the customized-based design approach³³

³⁴ Borutzki 2000

Dies geschieht über die Bestimmung der Reihenfolge, die in der Entwicklung der Elemente einzuhalten ist. Die Reihenfolge richtet sich nach den Wechselwirkungen, die zwischen der Funktion, dem Verhalten und der Struktur des Systems bestehen.

Lippold beschreibt eine **domänenübergreifende Konzeptionsumgebung**³⁵ für die Entwicklung von mechatronischen Systemen. Betrachtet wird das System in drei sich ergänzenden Modellbildungs- und Handlungsebenen. Dies ist die Funktionsebene, in der eine Funktion die Eigenschaftsänderung eines Objekts als Folge von Energie-, Stoff- und Informationsumsätzen darstellt. Des Weiteren ist dies die Wirkebene, in der die Wirkung eine lösungsbezogene Formulierung der Funktion(-en) ist und die Verhaltensebene, in der das Verhalten einer Änderung der Zustandsgrößen des Systems als Folge von Interaktionen mit anderen Systemen entspricht.

In einem sechsstufigen Partitionierungsschema gelangt Lippold von einem unpartitionierten Konzept zu einer detaillierten Unterteilung (Abbildung 2.2-8). Die Stufen beschreiben Zustände des Systems, und die Entwicklung findet im jeweiligen Übergang statt. Der anfängliche Konzeptzustand wird in der ersten Stufe in einen energiedominierten und einen informationsdominierten Bereich aufgeteilt. Im Übergang zur zweiten Stufe wird durch das Bestimmen von Teilen, die zwischen dem energiedominierten und dem informationsdominierten Bereich koppelnd wirken, das vollständige mechatronische Basismodell herausgearbeitet. In diesem wirkt ein Akteur an einem System, an dem ein Sensor physikalische Größen bestimmt und diese an ein IT-System weiterleitet, das wiederum Signale an den Akteur sendet. In der dritten Stufe wird durch die Einbeziehung von domänenübergreifenden Zusammenhängen eine ganzheitliche Systemansicht beschrieben. Im Weiteren wird das mechatronische Basismodell partitioniert und den Domänen zugeordnet. In den Stufen vier und fünf wird die Unterteilung im mechanischen und im elektrischen Anteil, bis zum gewünschten Detaillierungsgrad, verfeinert. Die Modellbildung und die Konzeption erfolgen durch eine Kombination von Konzeptionselementen, die mit einer objektorientierten Darstellung einhergeht. Als Wissensspeicher wird eine Datenbank eingesetzt.

³⁵ Lippold 2000

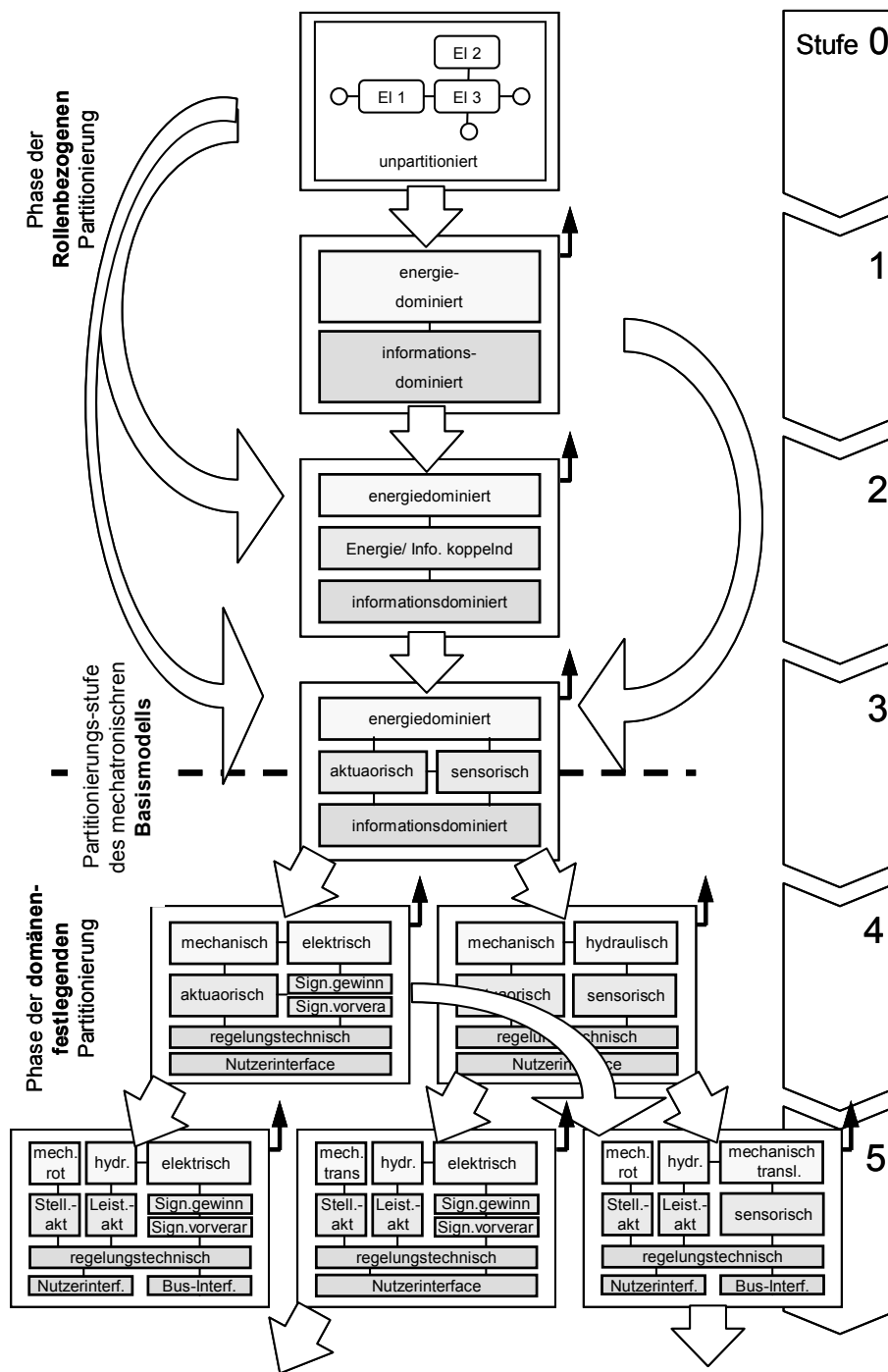


Abbildung 2.2-8: Partitionierungsschema zur methodischen mehrstufigen Partitionierung mechatronischer Systeme³⁶

Kallenbach stellt mit dem **Phasenmodell**³⁷ (Abbildung 2.2-9) einen Top-down-Prozess für den Entwurfsprozess von mechatronischen Systemen vor. In frühen Phasen des Entwurfs ist zur Reduktion des Entwurfsaufwands der Lösungsraum über eine Präzisierung der Aufgabenstellung zu verkleinern.

³⁶ Lippold 2000

³⁷ Kallenbach et al. 1997

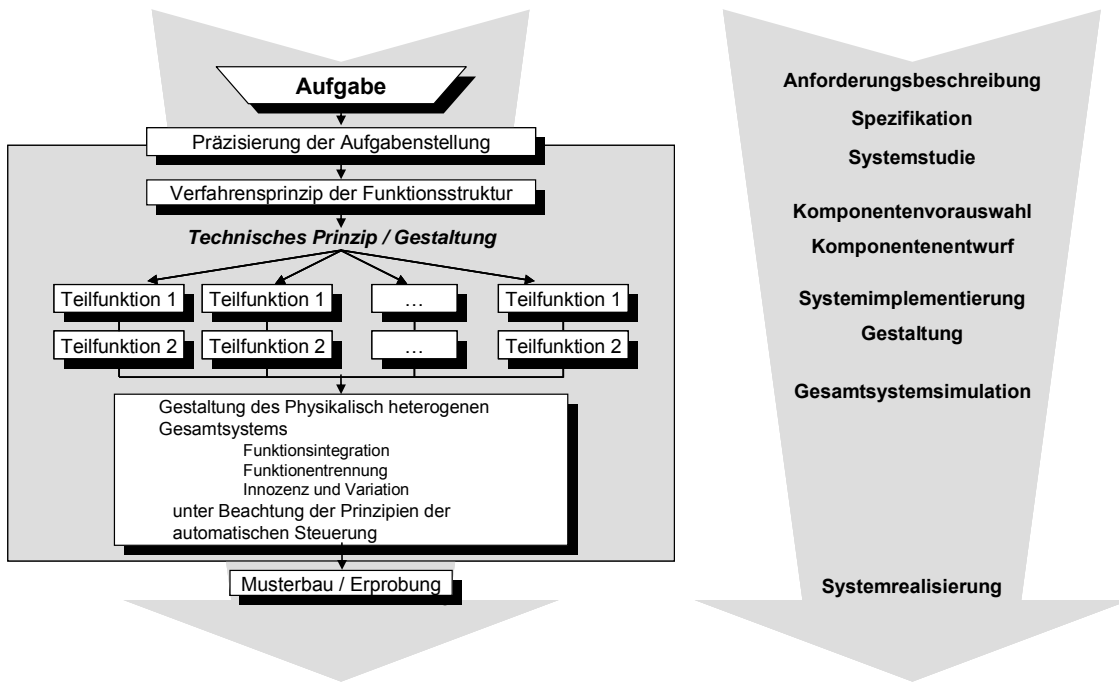
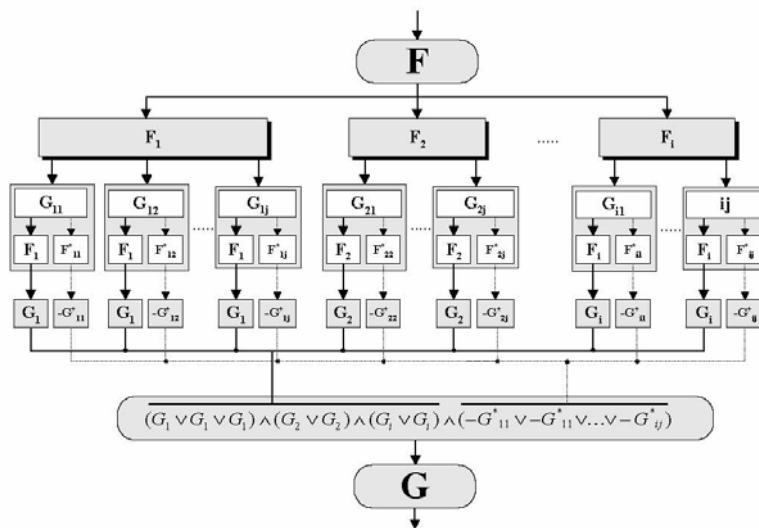


Abbildung 2.2-9: Phasenmodell mechatronischer Systeme³⁷

In allen weiteren Phasen ermöglicht die Präzisierung der Spezifikationen eine Verringerung der Anzahl der Analyse-Synthese-Schleifen, die durch Informationen entstehen, die nicht in den Entwurf einbezogen wurden. Der entscheidende Schritt beim Entwurf ist der Funktionsstrukturübergang. In diesem wird eine Unterteilung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen vorgenommen und es werden Elemente gestaltet, die diese Teilfunktionen möglichst optimal erfüllen (Abbildung 2.2-10).



F Gesamtfunktion, F_i Teilfunktionen, G_{ij} Gestalt zur Erfüllung der Teilfunktion F_i, F_{ij} Störfunktion, -G_{ij} Gestalt zur Kompensation der Störfunktion

Abbildung 2.2-10: Ermittlung der Teilfunktionen und Gestaltbildung nach Kallenbach³⁷

Wichtig ist hierbei ein Funktionsstrukturspeicher als Wissensbasis auf der untersten Ebene und eine Vorgehensweise für die Auswahl der Komponenten und deren Integration. Ziel ist hierbei, ein globales Optimum bezüglich der Funktionserfüllung zu

erreichen und die dazu notwendigen Entwürfe auf eine tolerable Anzahl einzuschränken. Ein wichtiger Schritt im Entwurfsprozess ist die Beschreibung des mechatronischen Systems als Objekt, in dem neben Informationen über den Informations-, Energie- und Stoffaustausch auch Informationen über die Gestalt enthalten sind. Dies ermöglicht, den Teilfunktionen mehrere funktionserfüllende Gestaltstrukturen zuzuweisen. Unter Beachtung der Stoff-, Energie- und Informationsflüsse zwischen diesen Strukturen können störende Kopplungen vermieden werden.

Insbesondere für die Entwicklung von Mehrkörpersystemen eignen sich die **12 Schritte beim Entwurf mechatronischer Systeme**³⁸ von Isermann (Tabelle 2.2-1). Beginn der Entwicklung ist in der Regel die *erste Grundkonstruktion* einer bekannten Lösung für die mechanischen und die damit gekoppelten elektrischen, thermodynamischen oder chemischen Teilprozesse. Im nächsten Schritt erfolgt eine *Aufteilung der Grundfunktionen* in solche, die dem Prozess, und solche, die der Informationsverarbeitung angehören. Hierbei ist zu entscheiden, welche Funktionen unter Ausnutzung der Möglichkeiten, die mechatronische Systeme bieten, auf digitalelektronischem Weg einfacher, besser oder kostengünstiger gelöst werden können. Im nächsten Schritt erfolgt eine Auswahl der *Sensoren, Aktoren* und der dazugehörigen *Hilfsenergie*. Hierbei ist im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit abzuwägen, mit welchen Mess- und Stellgrößen der Prozess beeinflusst werden kann. Eine Auswahl der Aktoren und Sensoren erfolgt anhand verschiedener Parameter wie der Dynamik, der Auflösung und der Robustheit. Mit diesen Informationen über die Mess- und Stellgrößen ist es möglich, die *Grundfunktionen der Informationsverarbeitung* festzulegen. Hierin sind die Ebenen der Steuerung und Regelung, der Überwachung und Fehlerdiagnose und das Prozessmanagement enthalten. Im nächsten Schritt wird für die *Bedienung* das Interface zwischen Mensch und Maschine gestaltet. Als nächstes erfolgt eine Festlegung der elektronischen *Hardware-Architektur*, die von der Größe des mechatronischen Systems, den Anforderungen an die Echtzeit, der Größe der Serie und dem Anbringungsort der Hardware abhängig ist. Hiernach kann die darauf angepasste *Software* zur Umsetzung der Anforderungen erstellt und validiert werden. Im nächsten Schritt erfolgt die *funktionelle Integration von Prozess und Elektronik*. Dies beinhaltet bauliche Integration der Komponenten der Hardware und eine Integration der Software. Hierdurch ist es möglich, das System als Ganzes zu sehen und dies durch ein iteratives Bearbeiten der Schritte zwei bis sieben zu modifizieren. Im Anschluss ist es möglich, das Gesamtsystem zu *vereinfachen*. Dies kann durch eine Vereinfachung der Mechanik geschehen oder durch eine geschickte Ausnutzung der mechatronischen Möglichkeiten.

³⁸ Isermann 1999 - S.23ff

1	Erste Grundkonstruktion des Prozesses (Mechanik, Elektrik, Thermodynamik)
2	Erste Aufteilung der Grundfunktionen Prozess ↔ Informationsverarbeitung
3	Sensorik, Aktorik, Hilfsenergie Prinzipien; bauliche Integration; dezentrale Signalverarbeitung ("intelligente" Komponenten)
4	Grundfunktionen der Informationsverarbeitung Steuerung, Regelung; Überwachung; Koordination, Optimierung
5	Bedienung, Mensch-Maschine Schnitt-Stellen Konventionelle Gestaltung; neue Möglichkeiten
6	Hardware-Architektur Mikroprozessoren (standardisiert, speziell); dezentrale-zentrale Grundstruktur; Bussystem
7	Software Aufgaben, Anforderungen; Lösungskonzeption; Software-Struktur; Implementierung (Codierung); Validierung; Sprache (prozessorabhängig); Echtzeitfähigkeit
8	Funktionelle Integration von Prozess und Elektronik durch Informationsverarbeitung Anpassung der Grundfunktionen; elektronische Dämpfung; Linearisierung durch Algorithmen; Beeinflussung nichtmessbarer Größen; große Betriebsbereiche durch adaptive Algorithmen; lernende Eigenschaften; Fehlerdiagnose
9	Vereinfachung der Grundkonstruktion Kinematik, dezentrale Antriebe; Entfall einer Linearisierung; Leichtbau; Entfall Zwischenspeicher
10	Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Sicherheit Fehlerfrüherkennung; Redundanz, Fail-Safe; Rekonfiguration
11	Verwendung von besonderen Entwurfswerkzeugen Modellbildung, Identifikation; Simulation (auch Hardware-in-the-Loop); Optimierung (CAD) der Funktionen
12	Experimentelle Verifikation Komponenten; Gesamtsystem

Tabelle 2.2-1: Schritte beim Entwurf mechatronischer Systeme³⁸

Ziel des nächsten Schritts ist die Verbesserung der *Zuverlässigkeit und der Sicherheit* des Systems durch eine Erhöhung der Perfektion oder eine Verbesserung der Toleranzen. Durch den Einsatz von speziellen *Entwurfs-Werkzeugen* werden die Komponenten der mechatronischen Systeme aufeinander abgestimmt. Zum Schluss erfolgt schließlich die experimentelle *Verifikation des Gesamtsystems*.

Bemerkung:

Existierende Vorgehensmodelle für die Entwicklung mechatronischer Systeme beschreiben Zusammenhänge, die bei der Entwicklung allgemeiner mechatronischer Systeme zu beachten sind. Aufgrund der großen Unterschiede, die zwischen diesen

Systemen bestehen, können in den Vorgehensmodellen keine spezifischen Handlungsempfehlungen enthalten sein, sondern nur eine „ungefähre Marschrichtung“.

Die hier vorgestellten Vorgehensmodelle werden im Folgenden im Bezug auf ihren Nutzen bei der Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen verglichen. Dies erfolgt anhand von Handlungsschritten, die in der Entwicklung solcher Systeme zu bearbeiten sind.

Systemspezifische Prozessanpassung

IPEMM: Die Zusammenhänge, an denen sich die durch das IPEMM generierten Prozesse orientieren, ergeben sich produktspezifisch im Entwicklungsprozess. Die Anpassung an die jeweilige Situation erfolgt durch einen individualisierten SPALTEN-Prozess in der Mikro-Logik.

MVM: Die sieben allgemein gehaltenen Entwicklungsschritte können flexibel anhand der jeweiligen Entwicklungsaufgabe, für die keine Einschränkung besteht, aneinandergereiht werden.

VDI 2206: Es werden allgemeingültige Zusammenhänge beschrieben, die im Entwicklungsprozess zu beachten sind. Das hierbei angewandte Vorgehen kann vom Nutzer durch eine Hintereinanderschaltung von Problemlösungszyklen und durch ein mehrfaches Durchlaufen des gesamten Prozesses dem jeweiligen Szenario angepasst werden. Ein hierbei anzuwendendes Vorgehen ist nicht bestimmt.

O²MEN: Das Vorgehensmodell kann für allgemeine mechatronische Systeme genutzt werden. Nach jedem Prozessabschnitt erfolgt ein Funktionsabgleich, woraus sich eventuell durchzuführende Iterationen ergeben.

CBD: Die Methode richtet sich an allgemeine mechatronische Systeme. Das Vorgehen orientiert sich an den jeweiligen Bedingungen. Die Entwicklungsreihenfolge ergibt sich aus den im System bestehenden Zusammenhängen zwischen der Funktion, der Struktur und dem Verhalten, die in Modellen zu erkennen sind.

Domänenüberggr. Konzeptionsumgebung: Für das auszuarbeitende Konzept bestehen keine spezifischen Einschränkungen. Die Anpassung an das System erfolgt über eine angepasste Unterteilung in Subsysteme.

Phasenmodell: Das Phasenmodell kann auf allgemeine mechatronische Systeme angewandt werden. Eine Anpassung an das System erfolgt zu Beginn, über eine Präzisierung der jeweiligen Aufgabenstellung.

Entwurfsschritte mecha. Syst.: Die 12 hintereinander geschalteten Schritte, die auf allgemeine Systeme angewandt werden können, passen sich über ein iteratives Durchlaufen der Schritte zwei bis sieben und einer im Schritt neun nachgeschalteten Vereinfachung der Grundkonstruktion dem jeweiligen Prozess an.

Unterteilung des Gesamtsystems - Systemanalyse

IPEMM: Die Vorgehensweise, mit der die zu entwickelnden Systeme in Teilsysteme unterteilt werden, ergibt sich in der Situationsanalyse, die in jeder Phase des Produktentstehungsprozesses durchzuführen ist.

MVM: In der Phase „*Problem strukturieren*“ wird eine Unterteilung anhand eines Modells durchgeführt.

VDI 2206: Das System wird anhand der Domänen unterteilt. Der Entwurf wird domänenspezifisch durchgeführt.

O²MEN: Es findet keine Unterteilung des Systems in Teilsysteme statt, sondern eine Aufteilung des Entwicklungsprozesses in Anwendungsfälle, an deren Lösung Teams beteiligt sind.

CBD: Das System wird den Systemeigenschaften Funktion, Struktur und Verhalten zugeordnet.

Domänenüberg. Konzeptionsumgebung: Unterteilung des Systems in einem sechsstufigen Partitionierungsschema in Teilsysteme, die letztendlich den Domänen zugeordnet sind.

Phasenmodell: Funktionale Unterteilung des Gesamtsystems.

Entwurfsschritte mecha. Syst.: Ausgehend von einer Grundkonstruktion, wird eine Aufteilung anhand der Grundfunktionen vorgenommen.

Umgang mit systemspezifischen Wechselwirkungen

IPEMM: Eine Anpassung der Vorgehensweise an die Wechselwirkungen im System ergibt sich in der Situationsanalyse, in der diese ebenfalls registriert werden. Dies führt dazu, dass aufgrund der Wechselwirkungen Phasen im Produktentstehungsprozess und im Problemlösungsprozess parallel, seriell oder iterativ bearbeitet werden.

MVM: Ein Umgang mit den Wechselwirkungen ergibt sich durch eine angepasste Reihenfolge der sieben Elemente der Produktentwicklung, wofür keine Handlungsanweisung enthalten ist.

VDI 2206: Eine spezifische Handlungsempfehlung für den Umgang mit Wechselwirkungen und eine Bestimmung der sich daraus ergebenden notwendigen Entwicklungsreihenfolge ist nicht enthalten.

O²MEN: Die Auswirkungen von Wechselwirkungen ergeben sich aus dem Funktionsabgleichen nach jedem Entwicklungsschritt. Ein gesteuertes Vorgehen ist nicht vorgegeben.

CBD: Es wird allgemein dargestellt, wie die Entwicklungsreihenfolge den im System bestehenden Wechselwirkungen anzupassen ist, die in objektorientierten Darstellungen zu erkennen sind.

Domänenüberggr. Konzeptionsumgebung: Der Umgang mit den Wechselwirkungen ergibt sich aus den Beziehungen, die zwischen den in der Unterteilung entstandenen Teilsystemen bestehen.

Phasenmodell: Die im System enthaltenen Teilfunktionen sind in der Regel stark miteinander gekoppelt. Diesen Kopplungen, die erwünscht oder unerwünscht sind, kann mit Modellen oder analytisch begegnet werden³⁹.

Entwurfsschritte mecha. Syst.: Es wird kein explizites Vorgehen für den Umgang mit Wechselwirkungen empfohlen. Das System wird erst zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt in der Entwicklung als Ganzes betrachtet (Schritt 8 von 12), was für ein Erkennen der Wechselwirkungen notwendig ist.

Systementwicklung – Modelle – Stand der Technik

IPEMM: Die Anwendung von Modellen wird in den verschiedenen Phasen der Entwicklung empfohlen. Da es sich um ein Meta-Modell für den Entwurf von Entwicklungsprozessen handelt, ergeben sich die anzuwendenden Modelle und Datenbanken während der Erstellung der individuellen Prozesse.

MVM: Der Einsatz von Modellen ist vorgesehen. Es wird nicht darauf eingegangen, wie diese aussehen.

VDI 2206: Es ist vorgesehen, parallel zum gesamten Prozess das System mit Modellen abzubilden. Dem Anwender ist frei gestellt, welche Arten von Modellen und Datenbanken eingesetzt werden.

O²MEN: Die Modellbildung ist ein wesentlicher Bestandteil. Hierbei handelt es sich um Modelle der kinematischen, der dynamischen und der mechatronischen Funktion. Ziel ist, das Gesamtsystem komplett in einem Modell abzubilden. Der Einsatz von Datenbanken für die Lösungselemente ist vorgesehen.

CBD: Eine objektorientierte Modellbildung ist ein wichtiger Bestandteil, die mit der Entwicklung einhergeht, da hierdurch die Zusammenhänge im System abgebildet werden und das Nutzen von Datenbanken ermöglicht wird.

Domänenüberggr. Konzeptionsumgebung: Es werden objektorientierte Modelle beschrieben, die mit Datenbanken bedient werden.

³⁹ Grabowski et al. 1996

Phasenmodell: Modelle werden primär für die Abbildung der Funktionen eingesetzt, über die man durch die Beziehung zwischen Funktion und Gestalt zum realen Objekt gelangt.

Entwurfsschritte mecha. Syst.: Explizit werden keine Modelle angesprochen. Eine Verifikation des Entworfenen findet mit einer HIL (**H**ardware in the **L**oop) Untersuchung statt.

Entwicklungsmethoden für mechatronische Systeme bieten dem Nutzer in der Regel ein allgemein dargestelltes Vorgehen an, das dem jeweiligen Entwicklungsszenario anzupassen ist, das aber keine Hilfe dafür enthält, wie dies zu erfolgen hat. Dass eine Notwendigkeit dafür besteht, ein komplexes Gesamtsystem in Teilsysteme zu unterteilen und die zwischen den Teilsystemen bestehenden Auswirkungen in der Entwicklung zu beachten, wird von den Vorgehensmodellen allgemein anerkannt. Das gleiche gilt für die Abbildung des Systems mit Modellen. Ein Trend in den Entwicklungsmethoden ist der Einsatz von objektorientierten Modellen. Diese Modelle werden z.B. im Customization-Based Design (CBD) dafür genutzt, die im System bestehenden Wechselwirkungen zu erkennen und das Vorgehen danach auszurichten. Der Entwicklungsprozess im Objekt-Orientierten mechatronischen Entwurf (O²MEN) wird anhand objektorientierter Modelle organisiert. Solche Modelle bieten auch die Möglichkeit für eine Verifikation der Funktion und den Einsatz von Datenbanken. Das Integrierte Produktentstehung – Management Modell (IPEMM) ist eine umfassende Vorgehensweise für die Ableitung von spezifischen Entwicklungsprozessen und Vorgehensmodellen. Das in dieser Arbeit beschriebene Vorgehensmodell ist eine spezifische Anwendung des IPEMM auf die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen.

2.2.3 Modelle im Entwicklungsprozess

Zur Systembeschreibung werden im Folgenden zwei Modelle vorgestellt, mit deren Hilfe systemspezifische Zusammenhänge offensichtlich zu erkennen sind und die als Werkzeuge in der Entwicklung genutzt werden können. Beide Modelle nutzen eine Blackbox-Betrachtung für die Teilsysteme. Das eine befasst sich primär mit den Funktionen im Inneren und das andere mit den Übergängen zwischen den Teilsystemen.

2.2.3.1 Objektorientierte Darstellungen in der Entwicklung

Objektorientierte Darstellungen werden in vielen Entwicklungsmethoden angewandt, um komplexe Zusammenhänge im System auf eine für alle an der Entwicklung Beteiligten verständliche Weise darzustellen. Bei objektorientierten Diagrammen handelt es sich nicht um eine Methode, die in der Entwicklung angewandt wird, sondern um eine grafische, beschreibende Sprache. Die objektorientierte Modellierung

hat ihren Ursprung in den 90er Jahren in der Softwareentwicklung. Hieraus hat sich die Unified Modelling Language⁴⁰ (UML) entwickelt, bei der es sich um eine Modellierungssprache mit objektorientiertem Syntax handelt, mit der sich alle an der Entwicklung beteiligten Personen verständigen können. Mit dieser Sprache kann das System in unterschiedlicher Auflösung und unterschiedlicher Abstraktion, begleitend zu dessen Entwicklung, dargestellt werden. Das System wird hinunter bis zu den kleinsten nicht mehr teilbaren Einheiten gegliedert. Dies sind die Objekte, die Eigenschaften und Verhalten in sich vereinen und über Schnittstellen mit der Umgebung in Kontakt treten. Objekte, die eine gemeinsame Semantik, ähnliche Eigenschaften (Attribute), gemeinsames Verhalten (Operationen) und gemeinsame Relationen zu anderen Objekten aufweisen, werden in Klassen zusammengefasst⁴¹. Jedes Objekt ist Instanz seiner Klasse. Klassen können wiederum Instanzen von Klassen sein. In Abbildung 2.2-11 ist eine mehrstufige Vererbungshierarchie mit Instanzen dargestellt.

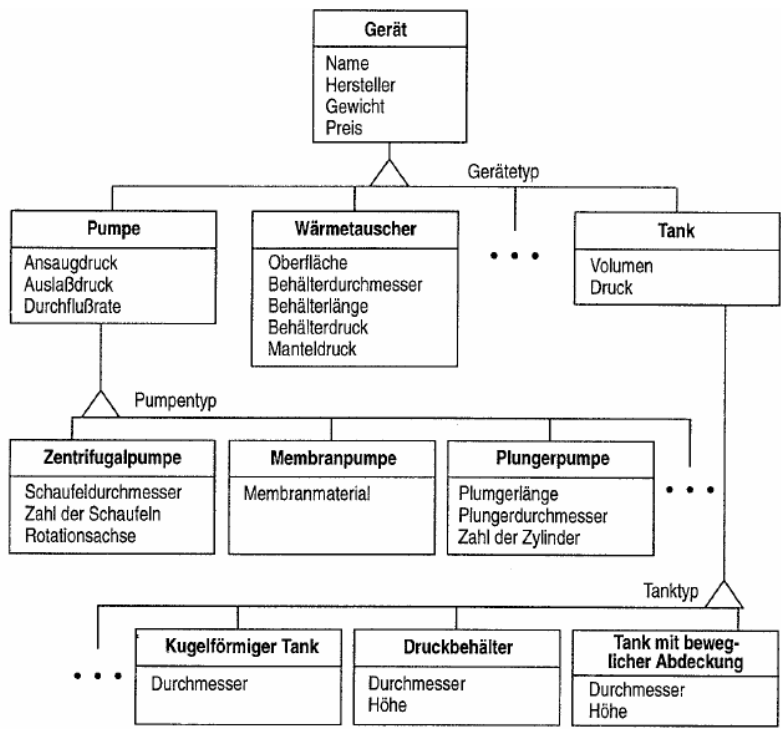


Abbildung 2.2-11: Mehrstufige Vererbungshierarchie mit Instanzen

Bei der Modellierung des Gesamtsystems aus Objekten kommt es mehr darauf an was ein Objekt ist, und nicht wie es verwendet wird⁴². Ziel dieser Modellierungsspra-

⁴⁰ Rumbaugh et al. 1993

⁴¹ Oestereich 2001

⁴² Rumbaugh et al. 1993 - S.10

che ist, die Wiederverwendung von Programmen oder von Programmabschnitten zu erleichtern, um der gestiegenen Komplexität der Software Rechnung zu tragen.

In der UML werden verschiedene Darstellungsarten angewandt, um Beziehungen zwischen Klassen oder zwischen Objekten und deren Verhalten darzustellen. Diese untergliedern sich in Strukturdiagramme, Verhaltensdiagramme und Interaktionsdiagramme. Strukturdiagrammtypen stellen die statischen Beziehungen im System in unterschiedlicher Auflösung und auf unterschiedlichem Abstraktionsgrad dar. Damit ist es z.B. möglich, zu Beginn der Entwicklung die grundlegende Struktur des Systems zu beschreiben, ohne dieses zu bestimmen, und eine detaillierte Beschreibung im Entwicklungsprozess darauf aufzubauen. Mit Verhaltensdiagrammen lassen sich die Zustände erkennen, die das System einnehmen kann. Eine Überprüfung der geforderten Funktionen erfolgt mit Interaktionsdiagrammen, in denen die Teilsysteme aufeinander einwirken und sich so die Gesamtfunktion ergibt. Interaktionsdiagramme bilden einen Teilbereich der Verhaltensdiagramme.

Bemerkung:

Objektorientierte Diagramme beschreiben Zusammenhänge in komplexen Systemen und nehmen dabei keinen Bezug zur Implementierung in eine Software. Daher ist es möglich, diese Modellierungssprache für die Veranschaulichung von Zusammenhängen in komplexen Systemen zu nutzen, die nicht als Ziel eine Umsetzung in eine Software haben⁴³. Diese Darstellungen sind insbesondere dann von Vorteil, wenn an der Entwicklung Personen unterschiedlicher Domänen beteiligt sind, wie dies z.B. bei mechatronischen Systemen der Fall ist, und diese eine Form der Kommunikation darstellen.

Der Modellierung von neuen Systemen, die aus einer Kombinationen von existierenden Komponenten (Objekte, Klassen) bestehen, kommt die Definition der Komponenten anhand ihrer spezifischen Eigenschaften und Funktionen entgegen, da dies keinen Einsatzzweck vorbestimmt⁴⁴. Die Objekte, die im Stand der Technik enthalten sind, lassen sich mit einem Zugriff auf die relevanten Eigenschaften in Klassendiagrammen systematisch ablegen, was eine Kombination der Objekte zu neuen Systemen ermöglicht⁴⁵.

⁴³ Abdalla 2006

⁴⁴ Welp et al. 2001 , Die konsequente Nutzung des objektorientierten Paradigmas erlaubt nach Welp eine Beherrschung der Komplexität mechatronischer Produkte

⁴⁵ Mikkola 2001

In den Domänen mechatronischer Systeme existieren leistungsfähige Werkzeuge für die Unterstützung domänenspezifischer Entwicklungen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine Integration dieser Werkzeuge zu einem universellen Entwicklungswerkzeug nicht zu erkennen. Daher sind die Entwürfe domänenspezifisch durchzuführen. Eine Möglichkeit, die Transparenz der Entwicklung für alle Beteiligten zu verbessern, ist die Darstellung in einem Gesamtmodell, an dem alle Domänen mit ihren eigenen Werkzeugen arbeiten können. Ein solches Gesamtmodell existiert zum momentanen Zeitpunkt noch nicht, aber es gibt Ansätze, den Informationsaustausch zwischen den Domänen mithilfe von objektorientierten Darstellungen zu verbessern.

2.2.3.2 Elementmodell – Contact and Chanel-Model⁴⁶

Das Contact and Chanel Model (C&CM) beschreibt Funktionen in technischen Systemen durch die dafür notwendigen Zusammenhänge zwischen den daran beteiligten Einheiten. Grundlage sind die Wirkflächen (WF), die sich am Rand der Körper befinden und in diesen über eine Leitstützstruktur (LSS) miteinander verbunden sind. Bei den Wirkflächen handelt es sich um verallgemeinerte Flächen, die allgemeine Körper begrenzen und zeitweise mit anderen Körpern in Kontakt stehen. Diese Körper sind aus Feststoffen, Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern zusammengesetzt. Die Struktur, die Anordnung und die Eigenschaften der Wirkflächen und der Leitstützstrukturen bestimmen das Verhalten des Körpers in seiner Umgebung.

Mithilfe des C&CM ist es möglich, Systeme im Entwicklungsprozess mit der jeweils gewünschten Auflösung darzustellen. Dieses Modell vermittelt die wesentlichen Informationen in einer für alle verständlichen Weise. Gleichzeitig werden unnötige Informationen weggelassen. Das Elementmodell, mit dem die Zusammenhänge zwischen Funktion und Gestalt systematisiert werden, ermöglicht die Integration verschiedener Modelldarstellungen. Dies gestattet eine Verknüpfung der Vorteile anderer Modellarten mit denen des Elementmodells.

Der Kern des Elementmodells wird von drei Grundhypothesen gebildet:

Nicht-Singularität: Jedes Grundelement eines technischen Systems erfüllt seine Funktion durch Wechselwirkung mit mindestens einem anderen Grundelement. Die eigentliche Funktion – und damit die gewünschte Wirkung – wird erst durch den Kontakt einer Fläche mit einer anderen Fläche möglich. Diese Flächen sind Wirkflächen und bilden zusammen ein Wirkflächenpaar. Ein Wirkflächenpaar (WFP) setzt sich aus genau zwei Wirkflächen zusammen.

⁴⁶ Mathiessen 2002 ; Albers / Alink 2007

Technische Funktion: Die Funktion eines technischen Systems oder eines technischen Teilsystems wird grundsätzlich über mindestens zwei Wirkflächenpaare und eine sie verbindende Leitstützstruktur verwirklicht. Funktionsbestimmend sind dabei allein die Eigenschaften und Wechselwirkungen der beiden Wirkflächenpaare und der sie verbindenden Leitstützstruktur.

Dynamisches Modell: Jedes System, das Funktionen erfüllt, besteht aus den Grundelementen Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur, die in beliebiger Anzahl, Anordnung und Form auftreten können. Dies ermöglicht eine gestaltfreie Blackbox-Betrachtung von Systemen, in der diese über mindestens zwei Wirkflächenpaare mit der Umgebung in Kontakt stehen. Es ist mit der C&CM-Analyse möglich, einen Gegenstand und seine Schnittstellen im Einsatz zu beschreiben. In Abbildung 2.2-12 ist die Funktionserfüllung eines Kugelschreibers in der Hand eines schreibenden Menschen dargestellt.

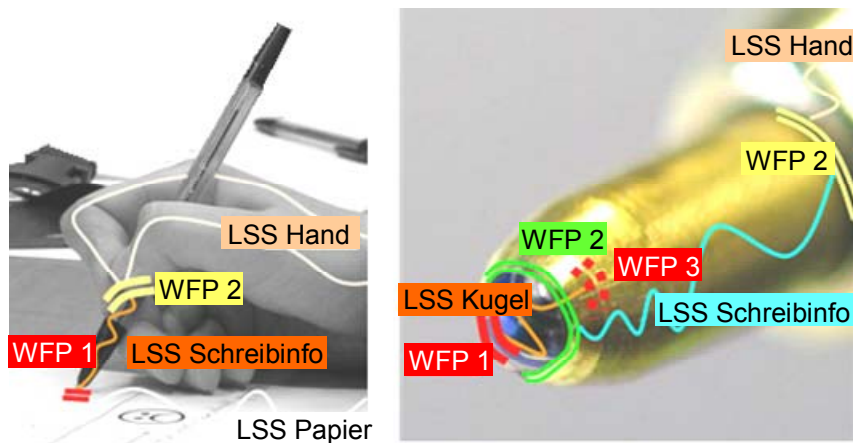


Abbildung 2.2-12: Funktion eines Kugelschreibers, hervorgehoben durch Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen⁴⁷

Der Kugelschreiber ist über ein WFP mit der Hand verbunden, worüber die Führungskräfte übertragen werden. Durch den Kugelschreiber verläuft eine LSS, die über ein WFP mit der Kugel verbunden ist und über die Schreibinformationen übertragen werden. Die Kugel überträgt die Tinte, zu der sie selber ein WFP besitzt, auf das Papier, was nur funktioniert, wenn die Wirkfläche des Papiers Adhäsionskräfte auf die Wirkfläche der Tinte überträgt.

Mit dem C&CM ist es hier möglich, den Funktionen an den Kontaktstellen der Leitstützstrukturen über die Wirkflächenpaare eine geometrische Struktur zu verleihen. Dies erfolgt in der für das jeweilige Modell gewünschten Auflösung. Wie in Abbildung

⁴⁷ Albers et al. 2007

2.2-12 zu erkennen, kann dieses Modell mit anderen Modellen, wie z.B. Fotos, Skizzen oder CAD-Darstellung kombiniert werden.

2.2.4 Zusammenfassung

Ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen stellt neben einer Ausrichtung des Prozesses auf die spezifischen Systemeigenschaften und Wechselwirkungen, die ein effizientes Vorgehen ohne langwierige Iterationen ermöglicht, auch unterstützende Methoden und Werkzeuge bereit, die für die jeweiligen Entwicklungsschritte benötigt werden.

Die VDI 2206 ist eine anerkannte Vorgehensweise für die Entwicklung von allgemeinen mechatronischen Systemen. Diese Richtlinie versetzt den Entwickler nicht in die Lage, effizient bestmögliche mechatronische Systeme zu entwickeln, da hierfür auf die Entwicklungsaufgabe zugeschnittene Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge benötigt werden⁴⁸. Dies lässt sich auf alle Vorgehensmodelle übertragen, die den Anspruch haben, die Entwicklung von allgemeinen mechatronischen Systemen zu unterstützen. Vorgehensmodelle, die dem Entwickler auf die Entwicklungsaufgabe abgestimmte Hilfestellungen anbieten, müssen speziell an die spezifischen Bedingungen angepasst sein und können daher nur für Systeme eingesetzt werden, in denen die gleichen Systemeigenschaften vorliegen.

Das Integrierte Produktentstehungs- Management Modell ist ein Meta-Modell für den Entwurf von Entwicklungsmethoden, das an die jeweiligen im System bestehenden spezifischen Bedingungen angepasst ist. Für die mithilfe dieses Modells entwickelbaren Systeme bestehen keine Einschränkungen.

Eine Modellierung des Systems mit objektorientierten Modellen, in Kombination mit dem Elementenmodell, ermöglicht eine Darstellung von komplexen mechatronischen Funktionen unter Beachtung der geometrischen Eigenschaften.

⁴⁸ Gausemeier / Frank 2006 - S.8

3 Zielsetzung der Arbeit

Mechatronische Systeme haben in modernen Maschinen und Apparaten einen wichtigen Stellenwert eingenommen. Kaum ein heute entwickeltes System kommt ohne Anteile aus, die der Mechatronik zuzuordnen sind. Dies hat zu einer ausgeprägten Diversifikation dieser Systeme geführt. Allgemeingültige Zusammenhänge, die innerhalb der mechatronischen Systeme gelten und in der Entwicklung zu beachten sind, werden in der Literatur beschrieben. Aufgrund der großen Vielfalt mechatronischer Systeme sind in den allgemeingültigen Darstellungen keine Handlungsanweisungen enthalten, die dem Entwickler eine Hilfe bei konkreten Entwicklungstätigkeiten bieten. Hieraus ergibt sich ein Bedarf nach Vorgehensmodellen für die Entwicklung von spezifischen Systemen. Diese Vorgehensmodelle orientieren sich an dem jeweiligen Zielsystem und können daher nur für die Entwicklung von Systemen mit dem gleichen grundlegenden Zielsystem genutzt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Beschreibung eines Vorgehensmodells für die Entwicklung von hochintegrierten maschinenbauzentrierten mechatronischen Systemen. Dies sind Systeme, in denen die Anteile der anderen Domänen zu den Anteilen der dominierenden Domäne Maschinenbau Wechselwirkungen aufweisen, sich aber nicht zwingend gegenseitig beeinflussen.

Der Blickwinkel auf einen Entwicklungsprozess wird immer von der Sichtweise der Domäne geprägt, aus der heraus er beschrieben wird. Das hier zu entwickelnde Vorgehensmodell beschreibt den Prozess aus der Sichtweise der Domäne Maschinenbau. Die Anteile der anderen Domänen gehen über Anforderungen oder Randbedingungen in den Aufbau des mechanischen Systems mit ein.

Ziel ist ein Vorgehensmodell, das folgende Bedingungen erfüllt:

- Das Vorgehensmodell unterstützt durchgehend die Entwicklung von komplexen maschinenbauzentrierten hochintegrierten mechatronischen Systemen.
- Das Vorgehensmodell ist auf die Systemeigenschaften von hochintegrierten Systemen zugeschnitten und passt sich den spezifischen Bedingungen an.
- Das Ergebnis aus der Anwendung des Vorgehensmodells entspricht den Anforderungen.
- Das Vorgehensmodell enthält eine Methode, mit der das komplexe Gesamtsystem zu Beginn der Entwicklung mit geringer Auflösung in Teilsysteme unterteilt werden kann. Im weiteren Verlauf unterstützt es eine detailliertere Unterteilung.

- Das Vorgehensmodell wendet eine Methode an, mit der die im System bestehenden Wechselwirkungen in der Entwicklung beachtet werden. Dies ermöglicht eine Vermeidung von Iterationen im Entwicklungsprozess, die auf ein Nichtbeachten der Auswirkungen von Teilsystemen zurückzuführen sind, die erst zu einem späteren Zeitpunkt entwickelt werden.
- Komplexe Systeme bestehen aus vielen Komponenten, für die wiederum verschiedene technische Lösungen existieren. Das Vorgehensmodell berücksichtigt den Stand der Technik der eingesetzten Komponenten und beschreibt Klassierungen, in denen die Systemelemente mit Zugriff auf die für eine Integration entscheidenden Eigenschaften abgelegt sind.
- Aufgrund der vielen Systemelemente und Teilsysteme, aus denen komplexe Systeme bestehen, ergibt sich eine große Anzahl von Kombinationen, die eine potentielle technische Lösung des Systems darstellen. Das Vorgehensmodell berücksichtigt alle zur Verfügung stehenden Systemelemente durch deren schrittweise Integration mit dem Auswahlkriterium der Kompatibilität im Gesamtsystem. Dies ermöglicht einen Umgang mit der Lösungsvielfalt.

Das Vorgehensmodell, das sich in Kapitel 4 aus theoretischen Überlegungen ergibt, wird in Kapitel 6 und 7 an der Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters angewendet.

Ziel der Anwendung des Vorgehensmodells auf die Entwicklung eines Roboterarms ist:

- Verifikation des Vorgehensmodells und dessen Anwendbarkeit unter veränderten Randbedingungen.
- Nachweis, dass sich der Konstruktionsprozess von komplexen Systemen auf logische Einzelschritte zurückführen lässt.
- Nachweis, dass Komponenten und Teilsysteme umfassend in Klassifikationen abgebildet werden können, und dass Auswahlprozesse zu eindeutigen Lösungen führen.
- Nachweis, dass durch die Anwendung eines systematischen Entwicklungsprozess für komplexe Systeme nur eine überschaubare Menge an Lösungsmöglichkeiten existiert, die den Anforderungen gerecht werden. Dies gilt auch, wenn die Systeme aus einer sehr großen Anzahl von Teilsystemen bestehen, für die viele technische Lösungen im Stand der Technik enthalten sind.

4 Systemanalyse, Wechselwirkungen, Vorgehensmodell

Die Entwicklung eines komplexen Systems stellt immer einen iterativen Prozess dar⁴⁹. Aufgrund der im System enthaltenen Wechselwirkungen können im Laufe der Entwicklung grundlegende Veränderungen am schon Entworfenen notwendig werden, was quasi einen Neubeginn der Entwicklung zu Folge hat oder zu einem Entwicklungsstopp führen kann. In diesem Kapitel wird ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen hergeleitet. Ein Ziel dieses Vorgehensmodells ist die Vermeidung von Iterationen im Entwicklungsprozess, die zu weitreichenden Veränderungen am schon entwickelten führen. Als Grundlage für das Vorgehensmodell erfolgt eine hierarchische Gliederung des gesamten Systems in Teilsysteme, die in der Entwicklung eine Einheit bilden. Der Entwicklungsprozess passt sich den Auswirkungen und Wechselwirkungen an, die zwischen den Teilsystemen bestehen, wodurch Iterationen in diesem verhindert werden können. Ziel dieses Vorgehensmodells ist es nicht, die kleinsten Einheiten dieser Unterteilung neu zu entwickeln, sondern den Stand der Technik für diese Einheiten zu nutzen, um daraus etwas Neues, den Anforderungen entsprechendes zu kombinieren. Der Entwurf dieser Kombinationen erfolgt über eine Anpassungskonstruktion zwischen den Komponenten. Konstruktionen werden in Abhängigkeit ihres Neuheitsgrads in Neukonstruktionen, Anpassungskonstruktionen und Variationskonstruktionen unterteilt⁵⁰. Der Neuheitsgrad bezieht sich hierbei auf das zu entwickelnde Gesamtprodukt oder auf Baugruppen und auf die eingesetzten Hilfsmittel und den organisatorischen Ablauf⁵¹. Das hierfür gewählte Vorgehen ermöglicht es, Konstruktionen mit einem hohen Neuheitsgrad zu entwickeln. Des Weiteren kann dieses Vorgehensmodell auch für eine iterative Weiterentwicklung einer bestehenden Lösung genutzt werden. Im Folgenden ist dargestellt, wie sich dieses Vorgehensmodell und die darin angewandten Methoden aus der beispielhaften Entwicklung eines humanoiden Roboters ergeben.

⁴⁹ Pahl et al. 2004

⁵⁰ Ehrlenspiel 1995

⁵¹ VDI-Richtlinie 2221

4.1 Systemanalyse

4.1.1 Strukturierungsschema

Für die Entwicklung von komplexen Systemen ist es notwendig, dieses in handhabbare Teilsysteme zu gliedern. Im Laufe des Entwicklungsprozess muss eine immer feinere Unterteilung erfolgen, was eine hierarchische Gliederung vom Groben zum Feinen ermöglicht⁵². Die hier angewandte Unterteilung hochintegrierter mechatronischer Systeme orientiert sich an der hierarchischen Strukturierung aus dem „Systems Engineering“⁵². Ein System besteht hiernach aus einer Menge von Elementen, die Eigenschaften besitzen und über Relationen miteinander verknüpft sind. Jedes System ist selbst Teilsystem eines nächst höheren, übergeordneten Systems, in dem es mit anderen Teilsystemen in Beziehung steht. Jede Einheit darf nicht als solche gesehen werden, sondern immer nur als Teil eines nächst höheren Ganzen. Das höchste System in dieser Struktur ist das Universum⁵³. Eine solche Unterteilung hochintegrierter mechatronischer Systeme stellt eine Top-Down-Einteilung in einer offenen Struktur dar. Das gesamte System, mit all seinen Funktionen und Eigenschaften, ergibt sich durch das Zusammenwirken der Systemelemente, welche in dieser Betrachtung die kleinsten nicht mehr zu unterteilenden Einheiten sind.

Die in Abbildung 4.1-1 dargestellte Struktur entspricht der von Hubka in der „Theorie Technischer Systeme“ beschriebenen Klassifikation von Maschinensystemen nach dem Komplexitätsgrad⁵⁴.

Systemelemente, oder nach Hubka Maschinenelemente, weisen die geringste und das System die höchste Komplexität auf. Dies vermittelt dem Konstrukteur eine Orientierung, da die zu entwickelnden Teilsysteme immer im Kontext mit anderen Teilsystemen betrachtet werden.

⁵² Züst 1997

⁵³ Patzak 1982 - S.6 ; Patzak 1982 - S.24

⁵⁴ Hubka 1984

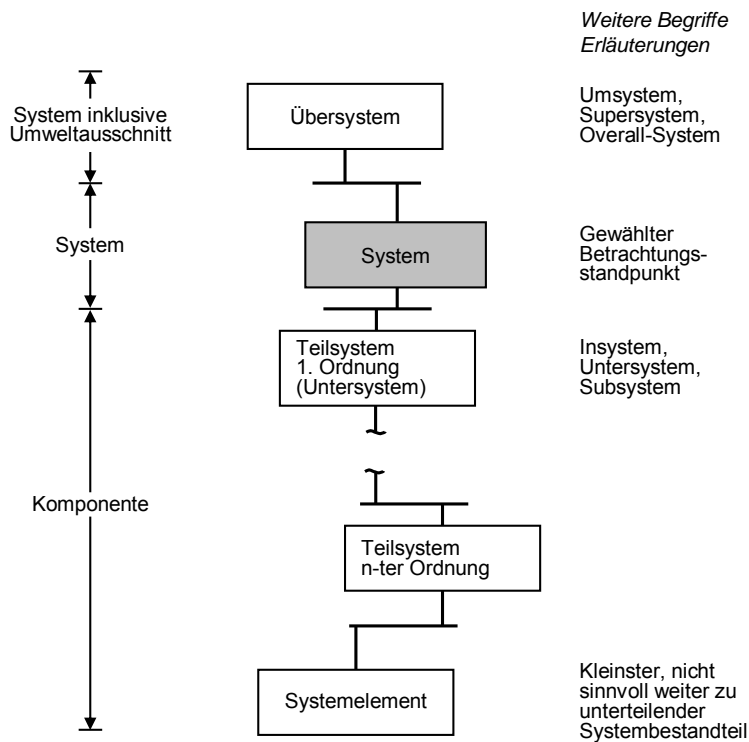


Abbildung 4.1-1: Allgemeine Aufbaustruktur von Systemen (hierarchische Gliederung)⁵³

4.1.2 Strukturierung hochintegrierter mechatronischer Systeme

In diesem Kapitel werden Systemeigenschaften bestimmt, die eine Strukturierung mechatronischer Systeme in Teilsysteme ermöglichen.

Eine häufig angewandte Methode zur Partitionierung von mechatronischen Systemen teilt diese in Systemanteile auf, die ihren Ursprung in den verschiedenen Domänen haben⁵⁵. In Abbildung 4.1-2 ist die synergetische Überschneidung der Disziplinen dargestellt, deren Summe mehr ist als deren reine Addition.

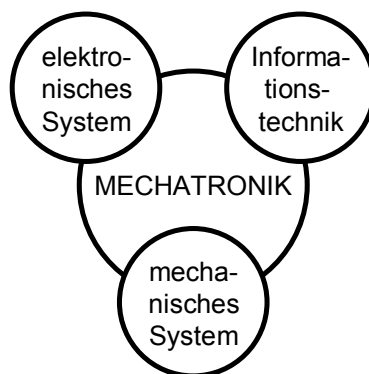


Abbildung 4.1-2: Mechatronik: Synergien aus verschiedenen Disziplinen⁵⁵

⁵⁵ Isermann 1993

Ziel der hier durchgeführten Strukturierung sind Teilsysteme, die in der Entwicklung separat betrachtet werden können. Eine Gliederung hochintegrierter mechatronischer Systeme nach Domänen ist aufgrund der starken räumlichen und funktionalen Integration aller domänenspezifischen Teilsysteme nicht zielführend. Die Einflüsse zwischen diesen Teilsystemen haben zur Folge, dass sie nicht separat betrachtet werden können. Für eine Unterteilung solcher Systeme werden daher andere Kriterien als die Domänengrenzen benötigt.

Das bei mechatronischen Systemen im Bezug auf die Funktion dominierende mechanische System⁵⁵ steht über Aktoren und Sensoren mit einem elektronischen System in Wechselwirkung (Abbildung 4.1-3). Eine Teilmenge des elektronischen Systems bildet das regelungstechnische System, in dem die Regelungstechnik mit der unterstützenden Softwaretechnik enthalten ist. Der Signalaustausch zwischen dem regelungstechnischen System und der Elektronik erfolgt mit Digitalanalog- und Analogdigitalwandlern. Signalflüsse sind Informationsflüsse, die mit Energieflüssen gekoppelt sind. Einflüsse zwischen Komponenten vollziehen sich immer in Form von Informations-, Energie- oder Stoffflüssen. In mechatronischen Systemen wirken Aktoren und Sensoren als Wandler für Flüsse zwischen dem mechanischen System und dem elektronischen System. Weitere Sensoren wirken als Wandler, mit denen das elektronische System die Umwelt wahrnimmt. Zwischen den Komponenten können weitere Einflüsse bestehen, die in den in Abbildung 4.1-3 dargestellten Hauptflüssen nicht enthalten sind. Ein Beispiel hierfür sind die EMV-Einflüsse der Aktoren oder der Umwelt auf das elektronische System. Diese sind in der Entwicklung mitzubeachten.

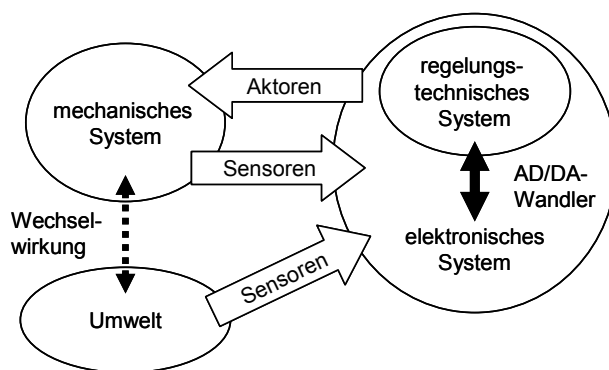


Abbildung 4.1-3: Struktur eines mechatronischen Systems

Bei dem mechanischen System, den Aktoren, den Sensoren und dem Regelungssystem handelt es sich um Teilsysteme, die eine oder mehrere Funktionen im mechatronischen System erfüllen. Daher ist es notwendig, diese in der Entwicklung als Ganzes zu betrachten. Das elektrische bzw. elektronische System ist Bestandteil der Aktoren, der Sensoren und des Regelungssystems und bildet daher bei dieser Unterteilung kein separates Teilsystem. Diese Teilsysteme werden im Weiteren als Funktionseinheiten bezeichnet, da ihnen eindeutige Funktionen zugeordnet werden können, die in ihrer Summe die Funktionalität des Gesamtsystems ergeben. In Abbildung 4.1-4 sind

die Funktionseinheiten mit den dazwischen bestehenden Wechselwirkungen dargestellt. Mit schwarzen Pfeilen sind die Hauptflüsse gekennzeichnet und mit weißen Pfeilen die Nebenflüsse.

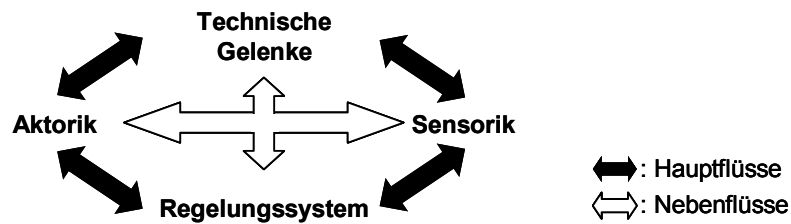


Abbildung 4.1-4: Wechselwirkungen zwischen den Funktionseinheiten hochintegrierter mechatronischer Systeme

Alle Funktionseinheiten wirken sich aufeinander aus, was in der Entwicklung zu beachten ist. Bei den Technischen Gelenken und dem Regelungssystem ist dies z.B. der eingeschränkte gemeinsame Bauraum. Bei einem Technischen Gelenk handelt es sich um die Repräsentation eines Gelenks in einer technischen Lösung, in der mindestens zwei Tragstrukturen über ein Wirkflächenpaar gelenkig zueinander beweglich sind. Diese Unterteilung in Funktionseinheiten ist unter Beachtung der Hauptflüsse äquivalent zu einem geschlossenen Regelkreis (Abbildung 4.1-5). Das Stellglied (die Aktorik) wirkt so auf die Strecke (das Technische Gelenk), wie es der Regler (das Regelungssystem) aufgrund der Informationen durch das Messglied (die Sensorik) vorgibt. Die Führungsgröße, d.h. der Sollwert, wird vom Zentralrechner vorgegeben.

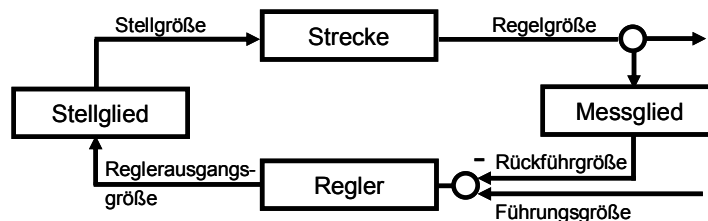


Abbildung 4.1-5: Geschlossener Regelkreis

4.1.3 Strukturierung des Systems eines humanoiden Roboters

Im Folgenden wird die hierarchische Strukturierung am Beispiel eines humanoiden Roboters angewandt. Die Nomenklatur dieser Gliederung wird von Patzak übernommen (Abbildung 4.1-1). Bei Robotern handelt es sich um Systeme, die aus einer großen Anzahl von Teilsystemen bestehen, in denen Anteile aus den verschiedenen Domänen enthalten sind, was eine hierarchische Unterteilung in mehrere Ebenen (Ordnung) ermöglicht. In dieser Unterteilung sind die Einheiten größerer Teilsysteme dadurch gekennzeichnet, dass sie über stärkere Wechselwirkungen in ihrem Inneren verfügen, als über Wechselwirkungen zu ihrer Umgebung (Im Folgenden wird dieser Umstand als „ausgeprägtere interne als externe Wechselwirkungen“ bezeichnet). Die kleinsten Teilsysteme, die separat betrachtet werden können, ermöglichen eine

Modularisierung. Eine weitere Unterteilung der Module orientiert sich an der Zerlegung der Gesamtfunktion der Module in Teilfunktionen, die von Teilsystemen erfüllt werden⁵⁶. Dieses Vorgehen wird im Folgenden als funktionale Unterteilung bezeichnet. Auf einer Ebene dieser funktionalen Unterteilung befinden sich die Funktionseinheiten mechatronischer Systeme, denen eine eindeutige Funktion zugeordnet ist (Abbildung 4.1-4). Funktionseinheiten bestehen wiederum aus Teilsystemen, die in ihrer Kombination diese Funktion bereitstellen.

Die im Folgenden aufgeführte Unterteilung am Beispiel eines humanoiden Roboters ist in Tabelle 4.1-1 zusammengefasst.

Übersystem

Der humanoide Roboter in seiner Umgebung bildet das Übersystem.

System (humanoider Roboter)

Hierbei handelt es sich um den humanoiden Roboter, der in dieser Betrachtung das zu entwickelnde System darstellt (in diesem Kapitel der gewählte Betrachtungsstandpunkt; siehe Abbildung 4.1-1).

Teilsystem 1. Ordnung (Oberkörper, Unterkörper)

Eine primäre Unterteilung des Systems des humanoiden Roboters teilt diesen in Ober- und Unterkörper. Die Wechselwirkungen innerhalb des Ober- und des Unterkörpers sind ausgeprägter als zwischen diesen. Daher können sie unter Beachtung der Schnittstellen separiert werden.

Teilsystem 2. Ordnung (Körperteil, z.B. Arm, Bein)

Die Teilsysteme 2. Ordnung sind die Körperteile des Roboters, die über ausgeprägtere interne als externe Wechselwirkungen verfügen. Dazu gehören im Oberkörper z.B. die Arme, der Torso und der Hals.

Teilsystem 3. Ordnung: Gelenkkomplex (Mehrfachgelenk inklusive Anbauteile, z.B. Schulter-, Ellbogen-, Handgelenk)

Teilsysteme der 3. Ordnung sind die kleinsten Komponenten, die eine Unterteilung anhand ausgeprägterer interner als externer Wechselwirkungen ermöglichen. Am Beispiel des Roboterarms sind dies das Schultergelenk, das Ellbogengelenk und das Handgelenk, inklusive aller zugehörigen Komponenten. Diese Unterteilung des Robotersystems entspricht einer Aufteilung in Gelenkkomplexe, in denen mehrere

⁵⁶ Kallenbach et al. 1997 , Diese Teilsysteme sind in der Regel stark miteinander gekoppelt, weshalb deren Auswahl nicht unabhängig voneinander erfolgen kann.

Drehgelenke zusammen eine Einheit bilden⁵⁷. Diese Einheiten können in der Entwicklung weitgehend separat betrachtet werden. Bei kleineren Einheiten ist dies nicht möglich, da zwischen ihnen starke Wechselwirkungen bestehen. Beispiele hierfür sind die einzelnen Gelenke im Gelenkkomplex der Schulter, die nicht getrennt voneinander betrachtet werden können, da sie räumlich und funktional stark integriert sind. Die Gelenkkomplexe ermöglichen eine Modularisierung. Das Prinzip der Modularisierung wird im Folgenden näher betrachtet⁵⁸.

Eine Modularisierung ermöglicht die ausgeprägte Komplexität von mechatronischen Systemen, wie die von Robotern, in der Entwicklung zu beherrschen⁵⁹. Damit ist es möglich, mit einer kleinen Anzahl von unterschiedlichen Modulen einen großen Funktionsumfang bereitzustellen⁶⁰. In der Elektrotechnik wird der Vorteil der Modularisierung vor allem in der einfachen Austauschbarkeit einzelner Komponenten gesehen, die in schaltungstechnischer Hinsicht eine in sich abgeschlossene Einheit darstellen⁶¹. Allgemein wird ein Modul als ein leicht austauschbares Element eines Systems betrachtet, das eine geometrische Einheit bildet und über Schnittstellen mit seiner Umgebung in Kontakt steht⁶². Der bei gut ausgearbeiteten Baukastensystemen erreichbaren hohen Hardwareflexibilität steht das oft höhere Volumen und der höhere Material- und Bauteileaufwand gegenüber⁶³. Diese Nachteile sind für hochintegrierte Systeme nicht akzeptabel, da in diesen aufgrund der räumlichen Integration die Module keine räumlich getrennten Einheiten darstellen können. Somit ist eine Modularisierung, die eine Austauschbarkeit von Modulen ermöglicht, für hochintegrierte Systeme nicht möglich. Die Definition von Modulen aus der VDI 2206 beinhaltet keine geometrische Abgrenzung: *„Modularisierung bedeutet die Bildung einer Produktstruktur mit Modulen, bei der die Beziehungen zwischen den Modulen geringer ausgeprägt sind als die Beziehungen innerhalb der Module. Damit lassen sich Wechselwirkungen zwischen den Modulen auf ein Minimum reduzieren“*⁶⁴.

Die in dieser Arbeit genutzte Definition von Modulen orientiert sich an der VDI 2206, betont aber zusätzlich, dass es sich bei dieser Modularisierung um ein Hilfsmittel in

⁵⁷ Schäfer 2000 - S.9 , Schäfer systematisiert die Gelenke im menschlichen Arm, um sie in mechanischen Gelenken abzubilden.

⁵⁸ Øystein 2003

⁵⁹ Möller et al. 2003

⁶⁰ Duray et al. 2000

⁶¹ Brockhaus 2005

⁶² Conrad 2005

⁶³ Kallenbach et al. 2001

⁶⁴ VDI-Richtlinie 2206 - S.18

der Entwicklung handelt („entwicklungsbezogene Modularisierung“): *Die Wechselwirkungen zwischen den Modulen sind geringer ausgeprägt als die internen im Modul. Module sind unter Anpassung der Schnittstellen zur Umgebung konstruktiv gegen Module mit der gleichen Funktionalität austauschbar und können in der Entwicklung aufgrund ihrer räumlichen und funktionalen Integration als Ganzes betrachtet werden.*

In Abbildung 4.1-6 ist die Unterteilung des Systems humanoider Roboter in Teilsysteme 2. und 3. Ordnung, bei denen es sich um Gelenkkomplexe bzw. Module handelt, dargestellt.

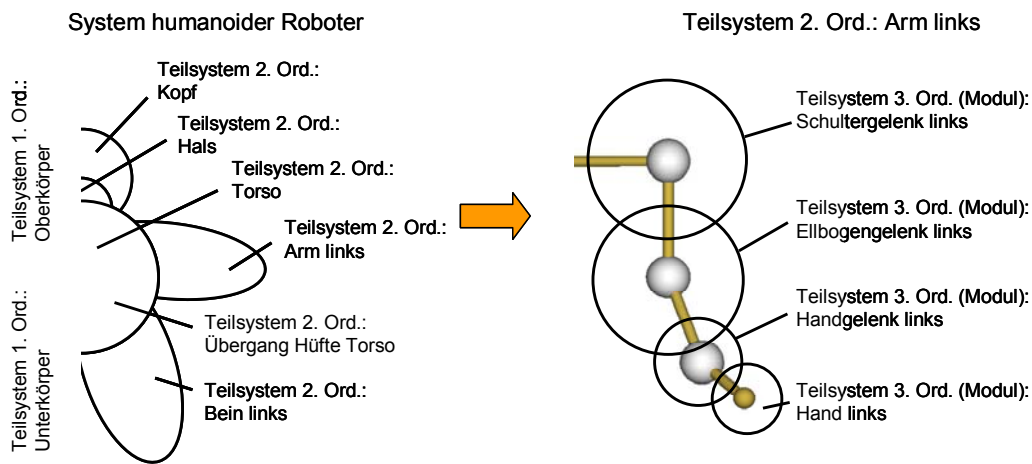


Abbildung 4.1-6: Gesamtsystem, Teilsysteme und Module humanoider Roboter

Teilsystem 4. Ordnung: Gelenkeinheit (Einzelgelenk inklusive Anbauteile, z.B. Einzelgelenke in der Schulter: Arm Schwenken, Arm Heben und Oberarm Drehen)

Dies ist ein Teil eines Gelenkkomplexes mit einem einzelnen Gelenk (Abbildung 4.1-7).

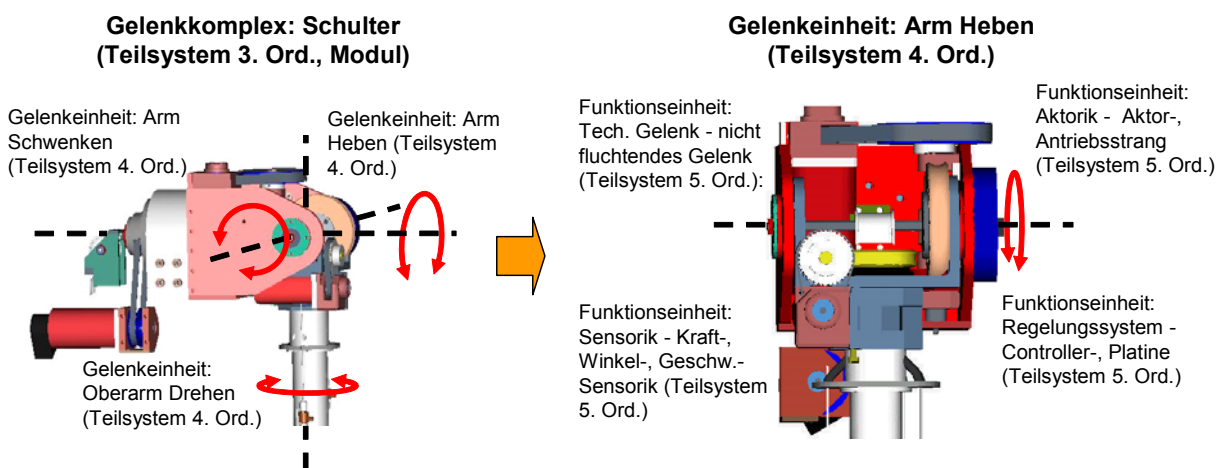


Abbildung 4.1-7: Modul Schulter mit drei Gelenken und Funktionseinheiten des Pitch-Gelenks

Zu den Gelenkeinheiten gehören alle Komponenten, die direkt mit diesen verknüpft sind und gemeinsam dessen Funktionen bereitstellen. Im Beispiel des Gelenkkomplexes der Schulter in Abbildung 4.1-7 sind drei Gelenkeinheiten hintereinander

geschaltet. Aufgrund der räumlichen Integration der Gelenkeinheiten in einem Gelenkkomplex können diese nicht getrennt voneinander betrachtet werden.

Teilsystem 5. Ordnung: Funktionseinheit (Technisches Gelenk, Aktorik, Sensorik, Regelungssystem)

Auf dieser Ebene findet die Unterteilung in Funktionseinheiten statt. Funktionseinheiten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine oder mehrere Funktionen erfüllen. Auf diese können die Anforderungen an das System des humanoiden Roboters abgebildet werden. Gemeinsam stellen alle Funktionseinheiten die Funktionalität des Roboters bereit. Funktionseinheiten sind das Technische Gelenk, die Aktorik, die Sensorik und das Regelungssystem. Diese Einheiten verfügen untereinander über ausgeprägte Wechselwirkungen und können somit nicht separat betrachtet werden. Funktionseinheiten müssen keine räumliche Einheit bilden. Ein Beispiel hierfür ist die Sensorik in einem Gelenkkomplex, die an räumlich getrennten Orten angebracht ist. In Abbildung 4.1-7 ist die Unterteilung des Gelenkkomplexes der Schulter in Gelenkeinheiten und die Unterteilung der Gelenkeinheit „Arm Heben“ in Funktionseinheiten dargestellt.

Systemelement (kleinste Einheiten, z.B. Servomotor, Antriebswelle, Zahnriemen)

Bei den Systemelementen handelt es sich um die kleinsten Einheiten dieser Unterteilung. Systemelemente stehen über Wirkflächenpaare mit ihrer Umgebung in Kontakt und verfügen über Eigenschaften und Funktionen. Sie müssen nicht physikalischer Natur sein, es kann sich beispielsweise auch um eine Software handeln. Systemelemente stellen das dar, was in einer objektorientierten Unterteilung als Objekt bezeichnet wird (Kapitel 2.2.3). Am Beispiel der Funktionseinheit „Aktorik“ der Gelenkeinheit „Arm Heben“ im Gelenkkomplex Schulter (Abbildung 4.1-7) sind dies die Systemelemente Servomotor, Zahnriemenübersetzung und ein Schneckengetriebe. An diesen Komponenten sind auch Systemelemente der Funktionseinheit Sensorik angebracht.

In Tabelle 4.1-1 ist die Unterteilung allgemeiner hochintegrierter mechatronischer Systeme und die Unterteilung des Systems eines humanoiden Roboters zusammengefasst und vergleichend dargestellt. „Größere“ Teilsysteme in dieser hierarchischen Gliederung werden anhand der stärkeren internen als externen Wechselwirkungen gebildet. „Kleinere“ ergeben sich in einer funktionalen Unterteilung. Oberhalb der Trennstelle befinden sich die Teilsysteme, die eine entwicklungsbezogene Modularisierung ermöglichen.

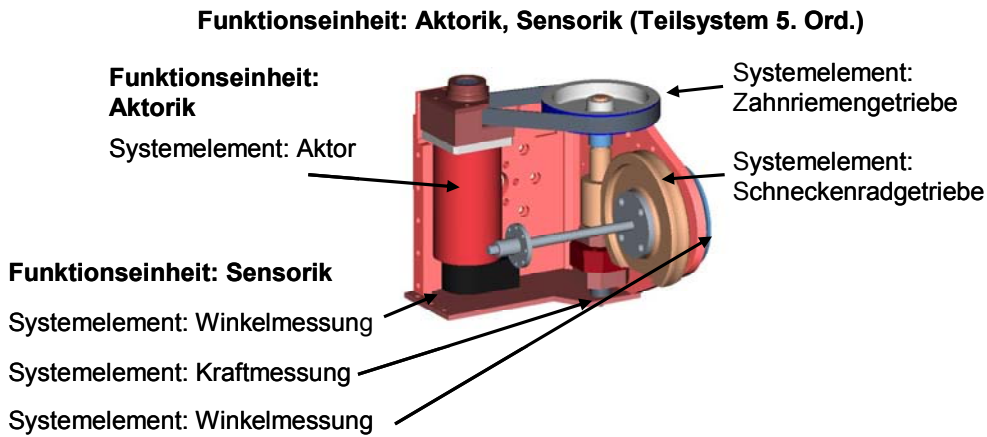


Abbildung 4.1-8: Systemelemente der Funktionseinheiten Aktorik in der Gelenkeinheit Arm Heben im Gelenkkomplex Schulter

	Ebene	Name	Kennzeichen	Teilsystem Humanoider Roboter	Beispiel
stärkere interne als externe Wechselwirkungen	Übersystem	System und Umwelt	Gesamtsystem in der Umwelt integriert	System in der Arbeitsumgebung	der Roboter in seinem Umfeld
	System	System	gesamtes hochintegriertes mechatronisches System (Betrachtungsstandpunkt-Gesamtsystem)	System	Gesamtsystem des humanoiden Roboters
	Teilsystem 1. Ordnung	Teilsystem	System mit ausgeprägteren internen als externen Wechselwirkungen	Teilsystem 1. Ordnung	Oberkörper, Unterkörper
	Teilsystem 2. Ordnung	Teilsystem	System mit ausgeprägteren internen als externen Wechselwirkungen	Teilsystem 2. Ordnung	Körperteile (Arm, Hals, Torso)
	Teilsystem (n-2)-ter Ordnung	Teilsystem (Modul)	kleinstes System mit ausgeprägteren internen als externen Wechselwirkungen, bildet eine funktionale Einheit um eine Mechanik	Gelenkkomplex (Modul)	Schulter-, Ellbogen-, Handgelenk, Hand
funktionale Unterteilung	Teilsys. (n-1)-ter Ordnung	Untersystem	Teile der Mechanik und die zugehörigen Anteile bilden eine Einheit, für die Funktionserfüllung zusammen zu betrachtet sind	Gelenkeinheit	Ellbogen Beugen, Unterarm Drehen
	Teilsystem n-ter Ordnung	Funktionseinheit	Einheit für die Erfüllung einer oder mehrerer für das Modul wichtiger Funktionen	Funktionseinheit	Tech. Gelenk, Aktorik, Sensorik, Regelungssystem
	Systemelement	Systemelement	in dieser Betrachtung unteilbares Element, „Objekt“	Systemelement (Objekt)	Servomotor, Harmonic-Drive-Getriebe, Seilzug

Tabelle 4.1-1: Allgemeine Unterteilung hochintegrierter mechatronischer Systeme und Unterteilung des Gesamtsystems humanoider Roboter

Im Folgenden ist der Betrachtungsstandpunkt der Arm eines humanoiden Roboters, der im Weiteren als System bezeichnet wird. Um den Umstand zu betonen, dass es sich bei dem System um eine Einheit handelt, in der eine größere Anzahl von Teilsystemen integriert ist und dieses System den Betrachtungsstandpunkt darstellt, wird es im Folgenden als Gesamtsystem bezeichnet.

4.2 Vorgehen bei der Entwicklung der Teilsysteme

In diesem Kapitel wird für die Entwicklung eines Gesamtsystems eine zeitliche Anordnung für die Entwicklung der darin enthaltenen Teilsysteme abgeleitet, mit dem Ziel der Vermeidung von weit reichenden Iterationen im Entwicklungsprozess. Die Reihenfolge ergibt sich aus den Informationsflüssen, die zwischen den Entwicklungen der Teilsysteme verlaufen. Diese sind so anzuordnen, dass die jeweils für den nächsten Entwicklungsschritt benötigten Informationen zur Verfügung stehen.

4.2.1 Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen

4.2.1.1 Design Structure Matrix

In einem System befinden sich Teilsysteme, zwischen denen Abhängigkeiten bestehen, die in der Entwicklung zu beachten sind. Die Reihenfolge, in der die Teilsysteme zu entwickeln sind, orientiert sich an den Informationsflüssen zwischen diesen Entwicklungen. Solche informationsflussbasierten Zusammenhänge lassen sich mit einer **Design Structure Matrix (DSM)** darstellen⁶⁵. Eine DSM⁶⁶ visualisiert auf einfache Weise die Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen eines komplexen Systems. Es handelt sich um eine quadratische Matrix, in deren Zeilen und Spalten jeweils die gleichen Elemente aufgelistet sind, die ein Objekt oder eine Handlung beschreiben. In der Matrix werden die Schnittpunkte markiert, wenn das Element in der Zeile von dem Element in der Spalte abhängig ist. Von links nach rechts gelesen bedeutet dies: Das Element in der Zeile ist von dem Element in der Spalte abhängig, wenn der Schnittpunkt markiert ist. Von oben nach unten gelesen bedeutet dies: Das Element in der Spalte hat Einfluss auf das Element in der Zeile. Hiermit lassen sich die grundlegenden Abhängigkeiten darstellen, die zwischen zwei Elementen bestehen. Diese Beziehungen zeigt Abbildung 4.2-1. Fall a): Das Element (B) ist von dem Element (A) abhängig. Fall b): Beide sind voneinander unabhängig. Fall c): Beide sind wechselseitig voneinander abhängig (sie sind gekoppelt).

Es gibt verschiedene Arten von Design Structure Matrizen. Eine Art bezieht sich auf statische Systeme wie Bauteilstrukturen oder Organisationsstrukturen und beschreibt die internen Abhängigkeiten von Subsystemen. Andere Arten beschreiben zeitabhängige Prozesse⁶⁷. Für die Organisation eines Entwicklungsprozesses bietet sich eine aktivitätsbasierte DSM für zeitabhängige Prozesse an, mit der ein Zeitplan für den Entwicklungsprozess erstellt werden kann. Hierin werden die Auswirkungen auf die

⁶⁵ Clarkson et al. 2004

⁶⁶ Browning 1998

⁶⁷ Browning 2001

weiteren Teilentwicklungen beschrieben, welche die Abarbeitung der Entwicklungstätigkeiten in einer bestimmten Reihenfolge hat. In dieser Matrix wird gekennzeichnet, wenn das Ergebnis aus der Entwicklung eines Teilsystems als Information für die Entwicklung eines weiteren Teilsystems benötigt wird⁶⁷. Voraussetzung für das Erstellen dieser Matrix, mit der die Reihenfolge der Aktivitäten im Prozess beschrieben wird, ist Kenntnis dieser Aktivitäten. Die Entwicklungsreihenfolge der Elemente (A-I) ist auf der rechten Seite in Abbildung 4.2-1 dargestellt. In dieser Matrix ist zu erkennen, wie sich die spezifische Reihenfolge A-I auf die Entwicklung der Teilsysteme auswirkt.

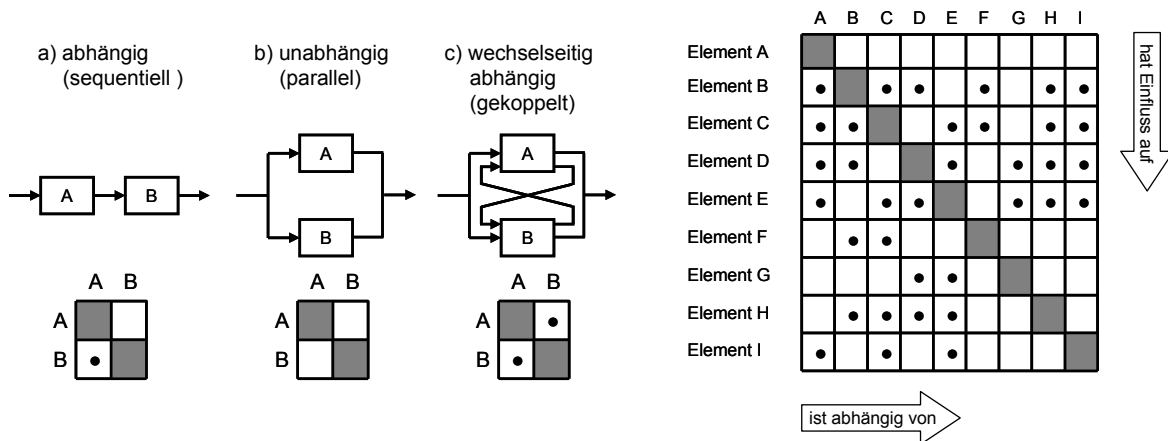


Abbildung 4.2-1: Darstellung von Zusammenhängen und deren Bedeutung in einer Design Structure Matrix⁶⁶

Ziel ist, die Entwicklungsreihenfolge so anzupassen, dass die Punkte, mit denen die Abhängigkeiten markiert werden, unter die dunkel hervorgehobene Diagonalachse der Matrix gelangen. Punkte, die sich darüber befinden, bedeuten ein Nacharbeiten in der Entwicklung, da hier eine Abhängigkeit von einem Element besteht, das erst später bearbeitet wird. Auch wenn es nicht möglich ist, durch eine Umstrukturierung alle Abhängigkeitsmarkierungen unter der Winkelhalbierenden zu platzieren, so ist es trotzdem sinnvoll, sie möglichst nahe an der Winkelhalbierenden zu positionieren, um die Auswirkungen der Iterationen zu minimieren.

Die DSM ermöglicht eine anschauliche Darstellung der Auswirkungen einer bestimmten Entwicklungsreihenfolge und offenbart die Entwicklungsschritte, die keine Auswirkungen aufeinander haben und somit gleichzeitig durchgeführt werden können⁶⁸. Es existieren verschiedene Algorithmen zur Vereinfachung dieser Matrizen⁶⁷.

⁶⁸ Clarkson 2004

4.2.2 Bestimmung der Entwicklungsreihenfolge und der internen Wechselwirkungen

Die Entwicklungsreihenfolge der Teilsysteme orientiert sich an der Notwendigkeit, wann welche Komponenten bzw. Informationen für das weitere Vorgehen zur Verfügung stehen müssen. Wenn wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Teilsystemen bestehen, ist es nicht möglich, die Entwicklungen der Teilsysteme zeitlich so anzuordnen, dass für ein sequentielles Vorgehen ein durchgängiger Informationsfluss bereitgestellt werden kann. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, mit der die internen Wechselwirkungen, die zwischen den in Kapitel 4.1.3 herausgearbeiteten Teilsystemen von humanoiden Robotern bestehen, berücksichtigt werden, was einen durchgängigen Informationsfluss im Entwicklungsprozess ermöglicht.

Konkretisierung des Zielsystems

Ausgehend von dem primären Zielsystem, bei dem es sich um die vom Roboter geforderten Tätigkeiten und Eigenschaften handelt, wird in der Konkretisierung des Zielsystems eine quantitative Anforderungsliste für die Teilsysteme des Roboters abgeleitet. Das ausgearbeitete Zielsystem beschreibt alle Ziele und deren Abhängigkeiten und Randbedingungen, nicht jedoch die Lösung selbst⁶⁹. Das Zielsystem orientiert sich an existierenden Komponenten und Konzepten, um sicher zu stellen, dass die Forderungen im Zielsystem zu erfüllen sind. In dieser Phase wird festgelegt wie innovativ das Konzept des Systems und wie groß daher die Unsicherheit in dessen Umsetzbarkeit ist.

In Tabelle 4.2-1 ist die Bestimmung dieser Eigenschaften und Konzepte in einer von 0 bis 3 bewerteten DSM aufgetragen. Dies entspricht der Stärke der jeweiligen Auswirkung. Diese Eigenschaften und Konzepte bauen aufeinander auf, woraus sich die Reihenfolge für deren Bestimmung, von A bis H, ergibt. Startpunkt sind die mechanischen Tätigkeiten, die der Roboter durchführen soll. Die Anzahl und die Lage der Drehachsen im Mehrkörpersystem sind zu bestimmen, damit dieses die geforderten Bewegungen durchführen kann (A). Um das Mehrkörpersystem geregelt betreiben zu können, muss es mathematisch beschreibbar (B) sein, was parallel zur Festlegung der Kinematik sicherzustellen ist. Hieraus ergibt sich die Dynamik der Gelenkbewegungen (C) beim Verrichten der Tätigkeiten. Zu diesem Zeitpunkt ist ein Regelungskonzept festzulegen (D), mit dem es möglich ist, den Arm in der gewünschten Weise einzusetzen. Aus dem Regelungskonzept und der Dynamik ergeben sich Anforderungen an die Aktorik (E) und an die Sensorik (F), die hierdurch konzeptionell festgelegt werden. Aus dem bisher Abgeleiteten lässt sich der ungefähre Bauraum der Rechner-

⁶⁹ Albers / Brudniok 2007

hardware (G) abschätzen und damit die möglichen Orte für deren Unterbringung bestimmen. Dies geht einher mit einem Konzept für die Verkabelung (H), die für den Anschluss der Komponenten im System erforderlich ist. Die Konzepte und Eigenschaften für den Arm des Roboters weisen Abhängigkeiten mit wechselseitigem Charakter auf. Daher lassen sich Iterationen bei deren Bestimmung nicht vermeiden. Anhand dieser Abhängigkeiten kann der erste Teil der Entwicklung in drei Bereiche gegliedert werden, innerhalb derer die Kopplungen wirken und die jeweils als Ganzes zu bearbeiten sind. Diese Bereiche sind in Tabelle 4.2-1 dick eingerahmt. Die in der DSM markierten Abhängigkeiten, die sich hier aus Überlegungen bezüglich der Funktionen ergeben haben, lassen sich ebenfalls in einer objektorientierten Darstellung erkennen und bestimmen.

		best. der Kinematik des Systems	math. Beschreibung der Kinematik	best. der Dynamik der Gelenkbeweg.	best. des Regelungskonzepts	best. des Antriebskonzepts	best. des Sensorkonzepts	best. des Rechnerhardwarekonzepts	best. des Verkabelungskonzepts
		A	B	C	D	E	F	G	H
best. der Kinematik des Systems	A	3							
math. Beschreibung der Kinematik	B	3							
best. der Dynamik der Gelenkbeweg.	C		2	2	2	2			
best. des Regelungskonzepts	D	2	2	2	2	2			
best. des Antriebskonzepts	E	2	2	3	3	1			
best. des Sensorkonzepts	F			1	3	2			
best. des Rechnerhardwarekonzepts	G	2		2	3	2		2	
best. des Verkabelungskonzepts	H	2		1	3	2		3	

kein Einfluss	
schwacher Einfluss	1
mittlerer Einfluss	2
starker Einfluss	3

Tabelle 4.2-1: Darstellung der Beeinflussungen von Eigenschaften und Konzepten in einer gewichteten DSM

In der Konkretisierung des Zielsystems werden ohne eine Auswahl von Systemelementen grundlegende Spezifikationen des Gesamtsystems festgelegt. Dieses spezifizierte Zielsystem wird als Anforderungen an den zweiten Teil der Entwicklung weitergegeben.

Systementwurf der Teilsysteme

Bei den Gelenkkomplexen handelt es sich um die kleinsten Einheiten, die aufgrund der Wechselwirkungen, die zu ihrer Umgebung und zwischen allen untergeordneten

Teilsystemen bestehen, in der Entwicklung als Ganzes betrachtet werden können (siehe Kapitel 4.1.3). Die Gelenkkomplexe im Arm des Roboters sind seriell angeordnet. Die Reihenfolge, in der die Gelenkkomplexe entwickelt werden, orientiert sich an dem in der Entwicklung notwendigen Informationsfluss, der mit der Position des Gelenkkomplexes im Mehrkörpersystem übereinstimmt (Tabelle 4.2-2). Von einem Einzelgelenk werden alle Komponenten mitbewegt, die weiter von der Basis entfernt angebracht sind. Daher sind diese Komponenten bei der Auslegung des Einzelgelenks mitzubeachten. Die Entwicklungsreihenfolge geht daher vom untergeordneten zum übergeordneten Gelenkkomplex. Ein Gelenkkomplex ist einem anderen untergeordnet, wenn er von diesem mitbewegt wird.

		Handkomplex	Handgelenkkomplex	Ellbogengelenkkomplex	Schultergelenkkomplex
		A	B	C	D
Handkomplex	A		1		
Handgelenkkomplex	B	3		1	
Ellbogengelenkkomplex	C	2	3		1
Schultergelenkkomplex	D	2	2	3	

kein Einfluss	
schwacher Einfluss	1
mittlerer Einfluss	2
starker Einfluss	3

Tabelle 4.2-2: Entwicklungsreihenfolge der Gelenkkomplexe im Arm des humanoiden Roboters, dargestellt in einer gewichteten DSM

Im Weiteren ist ein Vorgehen für die Entwicklung der Gelenkkomplexe zu bestimmen, das die internen Wechselwirkungen berücksichtigt. Um dies zu ermöglichen, ist eine methodische Unterteilung des Gesamtsystems in Gelenkkomplexe, Gelenkeinheiten und Funktionseinheiten durchzuführen. Die Funktionseinheiten, welche sich in einer funktionalen Strukturierung des Systems ergeben haben (siehe Kapitel 4.1.2), sind Teilsysteme, die in der Entwicklung der Gelenkkomplexe eine zentrale Rolle einnehmen, da ihnen die Funktionen des Roboters zugeordnet sind, die sich in der Konkretisierung des Zielsystems ergeben haben. Die Funktionseinheiten sind mit dem Ziel der Funktionserfüllung zu entwickeln, können aber nicht als separate Einheiten betrachtet werden. Daher ist bei deren Entwicklung eine Methode anzuwenden, die eine Beachtung der ausgeprägten Wechselwirkungen zwischen den Funktionseinheiten ermöglicht. Es ist eine Reihenfolge für die Entwicklung der Funktionseinheiten in einem Gelenkkomplex, unter Anwendung dieser Methode, zu bestimmen.

Wie stark sich die Eigenschaften und Konzepte, die sich in der Konkretisierung des Zielsystems ergeben haben (Tabelle 4.2-1), auf die Funktionseinheiten auswirken, ist in der bewertenden Matrix in Tabelle 4.2-3 zu erkennen. Die Funktionseinheiten sind

in dieser Tabelle in der Reihenfolge eingetragen, in der sie im Weiteren entworfen werden. Die Reihenfolge wurde nicht mit analytischen Verfahren bestimmt, sondern hat sich aus den offensichtlich zu erkennenden Hauptinformationsflüssen ergeben, die zwischen den Entwicklungsaktivitäten bestehen. Diese richten sich nach der geometrischen und funktionalen Anordnung der Funktionseinheiten im System. D.h. eine Funktionseinheit, an der eine andere Funktionseinheit wirkt, ist als erste von beiden zu entwerfen. Hieraus ergibt sich die in Tabelle 4.2-3 enthaltene Reihenfolge von A bis H.

Eigenschaften und Konzepte aus dem ersten Teil der Entwicklung		Kinematik des Systems	Dynamik des Systems	Regelungskonzept	Antriebskonzept	Sensorkonzept	Konzept Rechnerhardware	Verkabelungskonzept		
									kein Einfluss	
Funktionseinheiten und Schnittstellen eines Gelenkkomplexes										
Schnittstelle zum untergeordneten Gelenkkompl.	A				1	1	2	3		
Technisches Mehrfachgelenk	B	3	1	2	2	1	1	1		
Aktorik	C	3	3	3	3	1	1	1		
Kraftsensorik	D	1	1	3	1	3	1	1		
Winkelsensorik	E	1	1	3	2	3	1	1	kein Einfluss	
Gelenkrechner	F		1	3	2	3	3	3	schwacher Einfl.	1
Tragstruktur	G	2	2	2	1	2	2	1	mittlerer Einfluss	2
Schnittstelle zum übergeordneten Gelenkkompl.	H	1	1	1	2	1	1	3	starker Einfluss	3

Tabelle 4.2-3: Einfluss der Eigenschaften und der Konzepte des Roboterarms auf die Funktionseinheiten der Gelenkkomplexe

Vom untergeordneten Gelenkkomplex gehen Anforderungen bezüglich der Schnittstelle (A) an den hier betrachteten Gelenkkomplex ein. Das zentrale Systemelement im Gelenkkomplex ist das Mehrfachgelenk (B), an dem die weiteren Funktionseinheiten wirken. Das Gelenk benötigt einen Antrieb (C), in dem die Sensorik zur Kraftmessung (D) angebracht ist. Am Gelenk ist ein Winkelsensor (E) anzubringen. Für den Betrieb des Gelenkkomplexes sind Gelenkrechner (F) notwendig. Am Schluss werden alle Systemelemente mit einer Tragstruktur (G) verbunden, und die Informationen über die Schnittstelle zum nächsten Gelenkkomplex (H) können an diesen weitergegeben werden. Die Reihenfolge ließe sich ebenfalls mithilfe eines objektorientierten Strukturdiagramms bestimmen.

Alle Gelenkkomplexe des Roboterarms verfügen über eine ähnliche Struktur, und an alle werden ähnliche Anforderungen gestellt. Für die Beschreibung der Entwicklungsreihenfolge der Funktionseinheiten ergibt sich somit für alle Gelenkkomplexe die gleiche DSM. In Tabelle 4.2-4 sind die Auswirkungen, die zwischen den Entwicklun-

gen der Funktionseinheiten eines Gelenkkomplexes bestehen, in einer DSM dargestellt. Viele Funktionseinheiten beeinflussen sich gegenseitig, weshalb eine Umstrukturierung der Matrix nicht den gewünschten Erfolg erbringt, dass sich die Funktionseinheiten ohne Iterationen gestalten lassen. Damit ein in dieser Reihenfolge durchgeführter Prozess nicht zu ausgeprägten Änderungen am schon entwickelten System führt, werden die Komponenten, die Auswirkungen auf die momentan zu entwickelnden Komponenten nehmen, aber erst später entwickelt werden, über eine konzeptionelle Verifikation mitbetrachtet. In einer konzeptionellen Verifikation wird untersucht, ob im Stand der Technik Konzepte für die noch unbestimmten Komponenten enthalten sind, die mit der momentan zu entwerfenden Funktionseinheit kompatibel sind. Ziel ist sicherzustellen, dass die Grundbedingungen für alle später zu integrierenden Komponenten erfüllt sind. In Tabelle 4.2-4 sind die Punkte markiert, in denen eine prinzipielle Verträglichkeit mit noch nicht entwickelten Komponenten zu überprüfen ist.

		Schnittstelle zum Modul darunter	Technisches Mehrfachgelenk	Aktorik	Kraftsensorik	Winkelsensorik	Gelenkrechner	Tragstruktur	Schnittstelle zum Modul darüber
	A	B	C	D	E	F	G	H	
Schnittstelle zum Modul darunter	A	1							
Technisches Mehrfachgelenk	B	2	1	1	1	1	1		
Aktorik	C	2	2	2	2	1	1	2	
Kraftsensorik	D	1	3			1	1		
Winkelsensorik	E	3	2	1		1	2		
Gelenkrechner	F	3	2	3	3		2	2	
Tragstruktur	G	3	3	3	3	3		2	
Schnittstelle zum Modul darüber	H						2		

kein Einfluss	
schwacher Einfluss	1
mittlerer Einfluss	2
starker Einfluss	3

Tabelle 4.2-4: Darstellung der gegenseitigen Beeinflussung von Funktionseinheiten und Schnittstellen eines Gelenkkomplexes in einer gewichteten DSM

Der Stand der Technik der Systemelemente wird hierfür in Klassierungen zusammengefasst. In diesen sind neben Informationen über die Funktionserfüllung auch Angaben über die Integrierbarkeit der Systemelemente in einer spezifischen Umgebung enthalten. Diese Informationen sind notwendig, um mithilfe einer konzeptionellen Verifikation eine Aussage darüber treffen zu können, ob Konzepte von Systemelementen existieren, die zu dem System prinzipiell verträglich sind, ohne dass

die Systemelemente hierfür zu entwerfen sind. Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist der Entwurf der Aktorik für ein Gelenk, an der später in der Entwicklung eine antriebsseitige Kraftmessung anzubringen ist. Die Systemelemente des Antriebsstrangs und der Kraft- bzw. Momentenmessung sind hierfür in Klassierungen zu hinterlegen. Mithilfe einer konzeptionellen Verifikation ist beim Entwurf der Aktorik sicher zu stellen, dass ein Systemelement im Antriebsstrang enthalten ist, an dem ein Systemelement der Kraftmessung angebracht werden kann, das in der Klassierung enthalten ist und wodurch letztendlich Messungen mit den gewünschten Eigenschaften möglich werden. Diese Überprüfung verhindert eine vollständige Überarbeitung des Antriebs zu einem späteren Zeitpunkt, falls sich dann herausstellen würde, dass die geforderte Kraftmessung am entworfenen Antriebsstrang nicht möglich ist.

Systementwurf des Gesamtsystems

In dieser Phase werden die in den vorherigen Schritten separat entworfenen Gelenkkomplexe zusammengesetzt, und das System kann ab jetzt als Ganzes betrachtet werden. Nun ist es möglich, die Komponenten zu integrieren, die keinem einzelnen Gelenkkomplex zugeordnet sind, die aber als Randbedingung beim Entwurf der Gelenkkomplexe mitbeachtet wurden. Ein Beispiel hierfür ist die Verkleidung des Gesamtsystems. Nach der Integration aller zusätzlichen Komponenten ist es möglich, die Tragstruktur bezüglich der auftretenden Lastkollektive zu optimieren und die Aktorik abschließend auszulegen. Für das Vorgehen im dritten Teil der Entwicklung lässt sich im Voraus keine empfohlene Reihenfolge vorgeben, da sie von den spezifischen Anforderungen und Eigenschaften des Systems abhängt.

4.3 Vorgehensmodell für die Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme

Vorgehensmodelle unterscheiden sich durch die Flexibilität in ihrer Anwendung und ihrem Abstraktionsgrad, mit dem sie Gesamtzusammenhänge beschreiben. Das in diesem Kapitel beschriebene Vorgehensmodell beschränkt sich auf die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen und geht gezielt auf deren spezifische Eigenschaften ein. Die Entwicklung wird in diesem Vorgehensmodell aus der Sichtweise des Maschinenbaus heraus beschrieben.

Vom Vorgehensmodell wird gefordert, dass es allgemeingültig aufgebaut ist, sodass dadurch keine Vorbestimmungen für den Aufbau der Systeme entstehen und sich daraus keine Einschränkung für den Lösungsraum ergibt. Weiterhin muss das Vorgehensmodell den Übergang von der abstrakten, allgemeingültigen zu einer den spezifischen Einzelfall betreffenden Beschreibung unterstützen und bei konkreten

Aufgabenstellungen Methoden als Hilfe bereitstellen⁷⁰. Das Vorgehensmodell muss, um mit der Komplexität des Systems umgehen zu können, eine wiederholbare Unterteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme ermöglichen. In dieser Unterteilung muss sich die Vorgehensrichtung des Entwicklungsprozesses widerspiegeln – vom Abstrakten zum Konkreten. D.h. die Unterteilung erfolgt im Laufe der Entwicklung in mehreren Ebenen. Die oberste Ebene stellt dabei eine allgemeingültige Unterteilung dar, die dann eine weitere Unterteilung in Ebenen ermöglicht, bis auf der untersten Ebene die Systemelemente enthalten sind⁷¹.

Das Vorgehen in der Entwicklung von mechatronischen Systemen humanoider Roboter, das im vorhergehenden Kapitel beschrieben ist, wird im Folgenden auf allgemeine hochintegrierte mechatronische Systeme übertragen. Dies ist möglich, da in den Systemen die gleichen prinzipiellen Zusammenhänge bestehen und daher die Entwicklung nach dem gleichen Prozess durchgeführt werden kann. Der Prozess des Vorgehensmodells besteht aus drei Prozessabschnitten, die wiederum in Phasen strukturiert sind. In allen Phasen werden für die darin enthaltenen Handlungsschritte, das sind die jeweils zu bearbeitende Teile des Handlungssystems, Vorarbeiten und zu bearbeitende Entwicklungsschritte bereitgestellt. Die Prozessabschnitte sind hier in Form einer Matrix dargestellt (siehe Abbildung 4.3-1). In den Zeilen sind die nacheinander zu bearbeitenden Phasen enthalten und in den Spalten die für den jeweiligen Handlungsschritt notwendigen Methoden und Werkzeuge. Grundlegende Systemeigenschaften, die in den Handlungsschritten entworfen werden und bei denen sich erst später die Kompatibilität zu noch zu entwerfenden Komponenten herausstellt, sind im Rahmen einer konzeptionellen Verifikation abzusichern. In der Matrix sind diese Überprüfungen in der Spalte rechts neben den Handlungsschritten dargestellt. In einer weiteren Spalte ist das im jeweiligen Handlungsschritt benötigte Vorwissen über den Stand der Technik der zu integrierenden Systemelemente und die dabei anzuwendenden Methoden enthalten. In der vierten Spalte ist das aufgeführt, was nicht nur in einzelnen Phasen, sondern langfristig in der Entwicklung zu beachten ist. Hierbei handelt es sich z.B. um Modelle des Systems, die im Laufe der Entwicklung immer weiter spezifiziert werden, oder um Randbedingungen, die kontinuierlich zu beachten sind.

Konkretisierung des Zielsystems

Der Ausgangspunkt dieses Prozessabschnitts ist das primäre Zielsystem, das aus allgemeinen, lösungsneutralen Anforderungen an das System besteht. Im ersten Teil

⁷⁰ Möhringer 2004

⁷¹ VDI-Richtlinie 2221

der Entwicklung, der Konkretisierung des Zielsystems (Abbildung 4.3-1), wird anhand der Anforderungen dem System eine grundlegende Struktur zugeordnet und für diese quantitative Anforderungen abgeleitet. Dies erfolgt in drei Phasen. In der ersten ist eine Kinematik zu bestimmen, mit der die gewünschten mechanischen Bewegungen durchgeführt werden können. Die Kinematik ist, um die Regelbarkeit zu gewährleisten, auf ihre mathematische Beschreibbarkeit hin zu untersuchen. Um dies durchführen zu können, ist als Voraussetzung eine Methode einzubringen, die dies ermöglicht (z.B. Bestimmung der inversen Kinematik). Es ist abzusichern, dass die sich hieraus ergebende Kinematik mit einer technischen Lösung abgebildet werden kann. Diese Absicherung erfolgt im Rahmen einer konzeptionellen Verifikation.

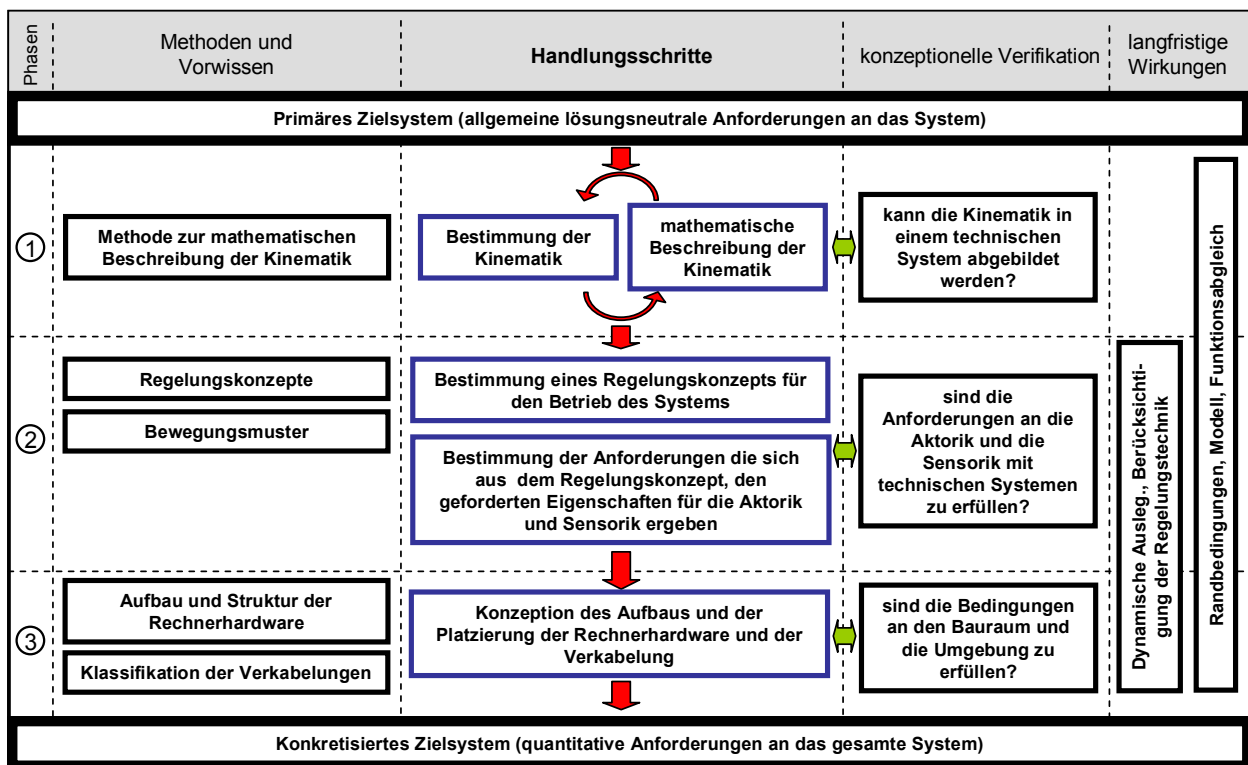


Abbildung 4.3-1: Prozessabschnitt: Konkretisierung des Zielsystems

In der Matrix der Prozessabschnitte befindet sich zwischen dem Handlungsschritt und der jeweiligen Verifikation grundsätzlich ein beidseitiger Pfeil, was ausdrückt, dass diese Verifikationen einen iterativen Charakter haben. In der zweiten Phase ist ein Regelungskonzept zu bestimmen, mit dem die mechanische Struktur, entsprechend den Anforderungen, betrieben werden kann. Hieraus ergeben sich grundlegende Anforderungen an die Aktorik und die Sensorik. In einer konzeptionellen Verifikation ist abzusichern, dass Konzepte für die Aktorik und die Sensorik existieren, mit denen die geforderten Eigenschaften erfüllt werden können. In der dritten Phase ist anhand der Anforderungen durch das Regelungskonzept die benötigte Rechnerhardware zu konzipieren. Dies ermöglicht eine primäre Aussage über die im System zu verlegende Verkabelung, in Abhängigkeit von dem Ort, an dem die Komponenten platziert werden. Das Ergebnis aus der Konkretisierung des Zielsystems sind quantitative

Anforderungen an das System, für die noch keine Konzepte vorliegen, deren Machbarkeit aber sichergestellt wurde.

Systementwurf der Teilsysteme

Im zweiten Teil der Entwicklung (Abbildung 4.3-2), dem Systementwurf der Teilsysteme, wird als Vorarbeit eine Unterteilung des Gesamtsystems in hierarchisch angeordnete Teilsysteme vorgenommen (Phase 0). Diesen Teilsystemen, insbesondere den darin enthaltenen Gelenkkomplexen und Funktionseinheiten, werden die Anforderungen aus dem ersten Teil der Entwicklung zugeordnet.

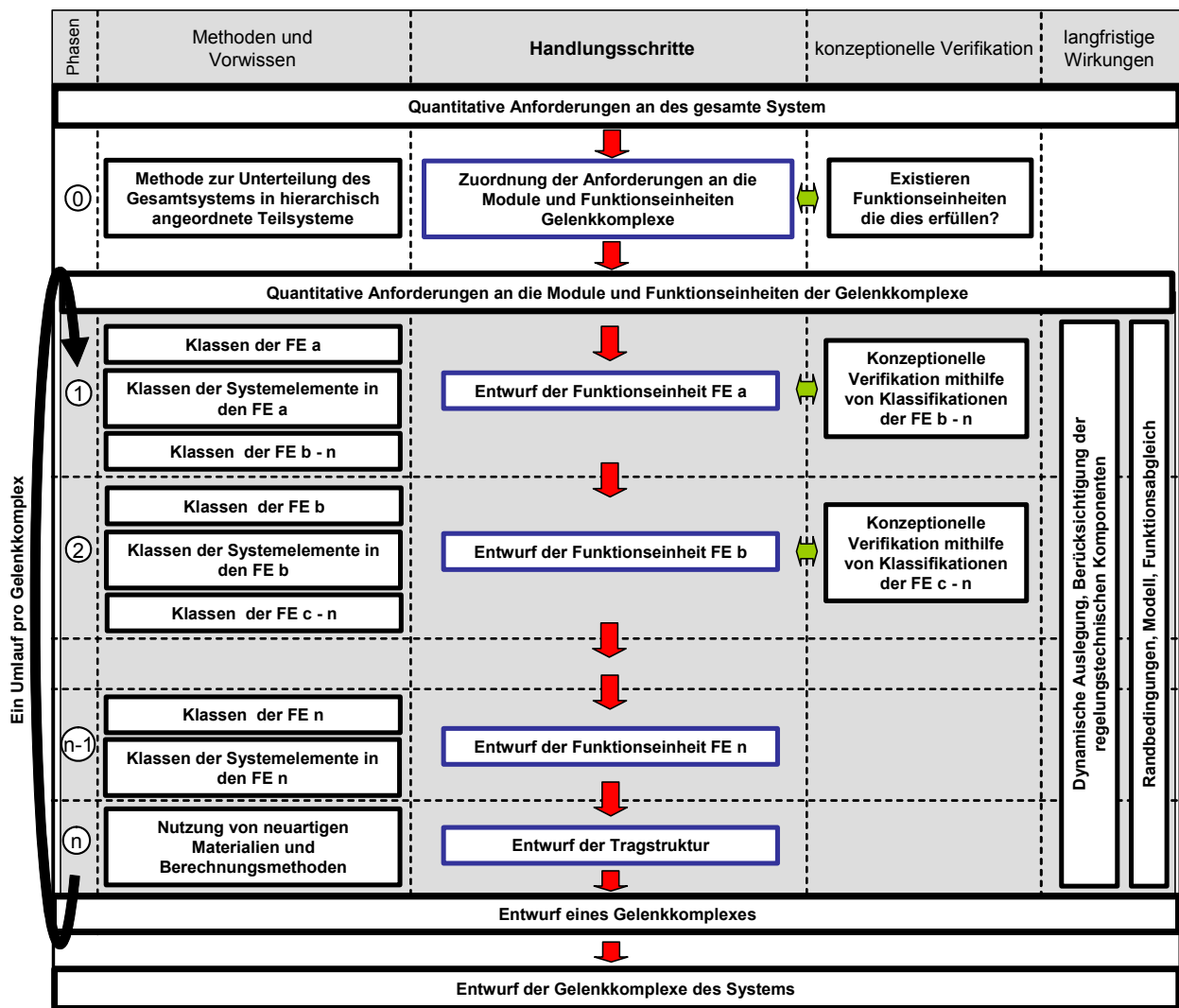


Abbildung 4.3-2: Prozessabschnitt: Systementwurf der Teilsysteme

Die Reihenfolge, in der die Teilsysteme dann zu entwickeln sind, orientiert sich an den Informationsflüssen, die von einem Gelenkkomplex für das als nächstes zu Entwickelnde bereitgestellt werden müssen. Dies ermöglicht eine teilweise Parallelisierung der Entwicklung ab dem Zeitpunkt, sobald die Schnittstellen zu dem als nächstes zu entwickelnden Gelenkkomplex bekannt sind. Im Rahmen einer Systemanalyse sind die Wechselwirkungen zu erkennen, die zwischen den Funktionseinheiten der

Gelenkkomplexe bestehen. Aus den primären Abhängigkeiten zwischen den Funktionseinheiten ergibt sich die Reihenfolge, in der sie zu entwickeln sind. Hierbei handelt es sich um die Abhängigkeiten, die sich ergeben, wenn eine Funktionseinheit an einer anderen eine Funktion ausübt. Als Vorwissen sind in den jeweiligen Phasen Klassifikationen der Funktionseinheiten und der Systemelemente einzubringen, in denen der jeweilige Stand der Technik enthalten ist. Dies wird zum einem für den Entwurf dieser Komponenten benötigt und zum anderen für Machbarkeitsanalysen, in denen für Funktionseinheiten auf konzeptioneller Ebene die Kompatibilität zu später zu entwerfenden Komponenten sichergestellt wird. Das Ergebnis dieses Teils der Entwicklung sind Entwürfe der Gelenkkomplexe, mit denen die Anforderungen erfüllt werden.

Systementwurf des Gesamtsystems

Im dritten Teil des Entwicklungsprozesses, dem Systementwurf des Gesamtsystems (Abbildung 4.3-3), werden die Entwürfe der Gelenkkomplexe kombiniert. An dieser Kombination können nun zusätzliche Teile angebracht werden, für die das Gesamtsystem zu betrachten ist und die bisher nur als Randbedingungen in Erscheinung getreten sind. Weiterhin können nun die Funktionseinheiten einer endgültigen Auslegung unterzogen werden. Das Ergebnis hieraus ist ein virtueller Prototyp, der in einem realen System aufgebaut werden kann.

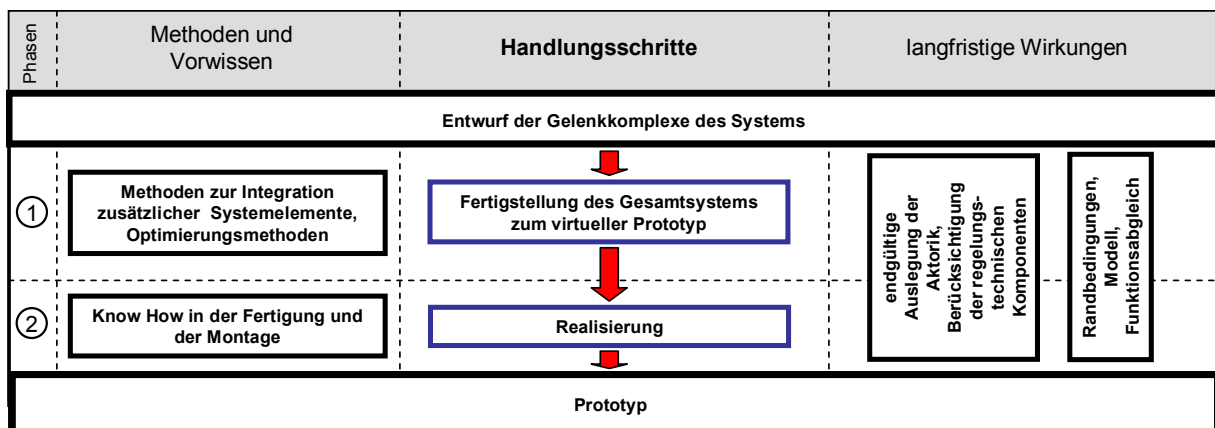


Abbildung 4.3-3: Prozessabschnitt: Systementwurf des Gesamtsystems

4.3.1 Einordnung des Vorgehensmodells in den Produktentstehungsprozess

Das Vorgehensmodell für hochintegrierte mechatronische Systeme ist in drei Prozessabschnitte gegliedert. Diese ergeben sich durch die Anwendung der ersten sechs Phasen des Meta-Entwicklungsprozesses IPEMM (Kapitel 2.2.1).

Der Startpunkt des ersten Prozessabschnittes, der Konkretisierung des Zielsystems, sind allgemeine lösungsneutrale Anforderungen an das System. D.h. zu Beginn besteht bereits eine klare Vorstellung davon, wozu das zu entwickelnde System in der

Lage sein soll. Dies entspricht dem Ergebnis der ersten Phasen des IPEMMs, der Profilfindung. Aus diesen Anforderungen werden im ersten Prozessabschnitt quantitative Anforderungen an das Gesamtsystem des Roboters abgeleitet. Das hierin enthaltene Vorgehen ergibt sich in der Anwendung der drei Phasen *Produktprofilfindung*, *Produktideenfindung* und *Produktkonzept* aus dem IPEMM. Im zweiten Teil des Entwicklungsprozesses, dem *Systementwurf der Teilsysteme*, findet ein Entwurf der Gelenkkomplexe und Funktionseinheiten statt unter Beachtung der gegenseitigen Abhängigkeiten. Die darin enthaltene Unterteilung in Teilsysteme und das Erkennen der Wechselwirkungen ergibt sich in einer Systemanalyse. Dieses Vorgehen ist in den Phasen *Produktkonzept* und *Produktentwurf* im IPEMM enthalten. Im dritten Teil, dem *Systementwurf des Gesamtsystems*, werden die Entwürfe der Teilsysteme zusammengefügt und zur Gesamtkonstruktion vervollständigt. Das Ergebnis hiervon ist ein Prototyp des Systems. In diesem Teil des Vorgehensmodells sind Anteile aus den Phasen *Produktentwurf*, *Produktvalidierung* und *Produktumsetzung* aus dem IPEMM enthalten. Eine Beschreibung der weiteren Bereiche aus dem Produktlebenszyklus ist in dem Vorgehensmodell nicht enthalten.

Das Vorgehen bei der Entwicklung hochintegrierter mechatronische Systeme nutzt in den einzelnen Handlungssystemen Anteile aus verschiedenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses. Ein Beispiel hierfür sind die konzeptionellen Verifikationen, in denen der Entwurf von Teilsystemen iterativ mit Informationen aus der Konzeption von noch zu entwickelnden Teilsystemen erfolgt. Dieses Vorgehen ergibt sich aus den Systemanalysen, die in jeder Phase das IPEMM enthalten sind, und führt zu einer zweidimensionalen Vorgehensweise entlang der Phasen des Entwicklungsprozesses und zwischen den Abschnitten des SPALTEN-Prozesses. In Abbildung 4.3-4 ist das IPEMM mit beispielhaft zwischen den einzelnen Phasen verlaufenden Navigationsrichtungen dargestellt.

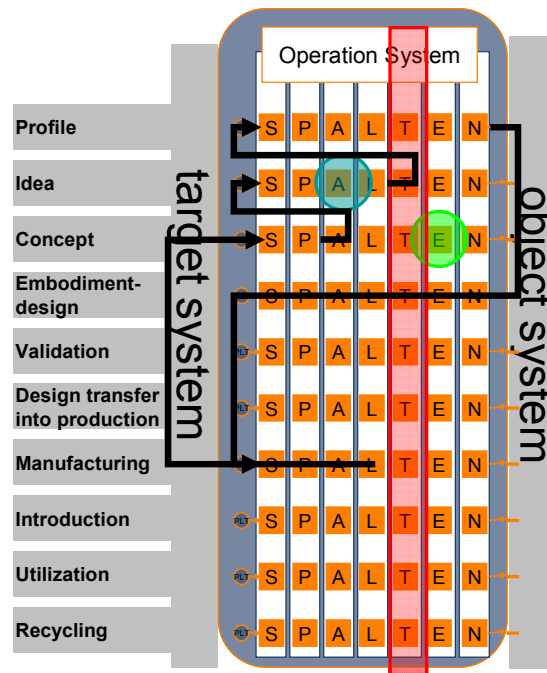


Abbildung 4.3-4: Integrierte Produktentstehung – Management Modell, mit zweidimensional verlaufendem Vorgehen⁷²

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen am beispielhaften Vorgehen bei der Entwicklung eines humanoiden Roboters abgeleitet. Dieses Vorgehensmodell besteht aus drei Prozessabschnitten. Im ersten werden aus den allgemeinen Anforderungen an das System quantitative Anforderungen bestimmt (Abbildung 4.4-1).

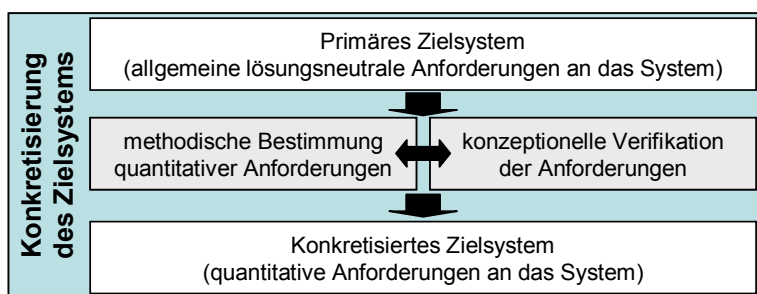


Abbildung 4.4-1: Konkretisierung des Zielsystems

Im zweiten Teil der Entwicklung (Abbildung 4.4-2) erfolgt eine serielle Entwicklung der (entwicklungsbezogenen) Module, die sich in einer hierarchischen Unterteilung ergeben haben. Dies sind die kleinsten Teilsysteme, die unter Beachtung der dazwischen liegenden Schnittstellen eine separate Betrachtung ermöglichen. In einer Systemanalyse ergibt sich die Reihenfolge, in der die darin enthaltenen Teilsysteme

⁷² Albers / Meboldt 2007b

zu entwickeln sind. Weiterhin wird eine Methode vorgestellt (konzeptionelle Verifikation), die es ermöglicht, mit den im System vorhandenen ausgeprägten Wechselwirkungen so umzugehen, dass Iterationen im Entwicklungsprozess weitgehend zu vermeiden sind.

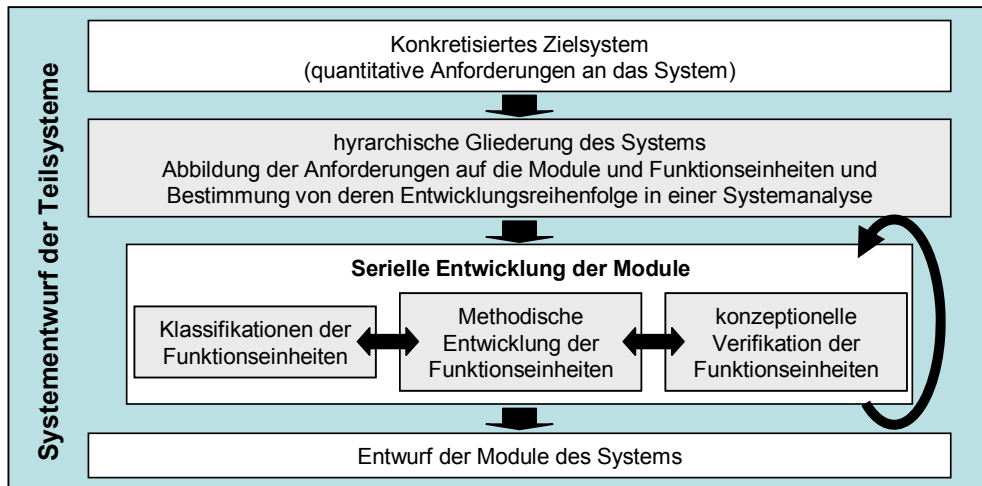


Abbildung 4.4-2: Systementwurf der Teilsysteme

Im dritten Teil der Entwicklung, dem Systementwurf des Gesamtsystems, werden die Module zusammengefügt. Das komplette System kann nun bis zum Prototypen entwickelt werden (Abbildung 4.4-3).

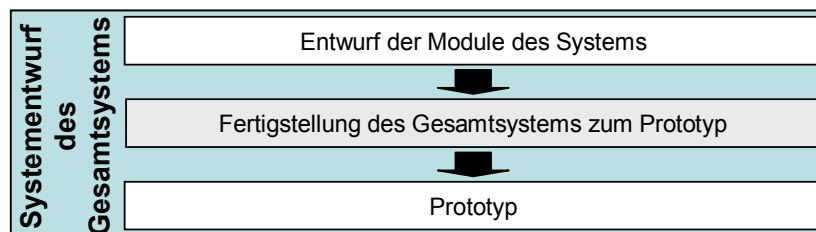


Abbildung 4.4-3: Systementwurf des Gesamtsystems

5 Morphologie von Systemelementen, Klassifikation

Komplexe Systeme bestehen aus einer großen Anzahl von Teilsystemen und Systemelementen. Im Stand der Technik ist eine große Anzahl von Systemelementen enthalten, die in ihrer Kombination die Funktionalität der Teilsysteme und diese wiederum in Kombination die Funktionalität des Systems ergeben. Um alle zur Verfügung stehen Systemelemente in der Konzeption berücksichtigen zu können, sind diese in umfassenden Klassifikationen einzuordnen. Diese gewähren Zugriff auf die Eigenschaften der Systemelemente, die für eine Integration ausschlaggebend sind. Diese Klassifikationen bilden in ihrer Gesamtheit eine Art Baukastensystem, mit dem es möglich ist, vorhandenes Wissen zu berücksichtigen. Im Folgenden werden die Merkmale von Systemelementen klassifiziert, die für die Konzeption und den Entwurf der maschinenbauzentrierten Teilsysteme humanoider Roboter benötigt werden.

5.1 Eigenschaften und Aufbau von Klassifikationen

Hubka klassifiziert funktionsbedingte Eigenschaften von technischen Systemen, die für diese charakterisierend sind und für das methodische Arbeiten des Konstrukteurs große Bedeutung haben. Hierbei handelt es sich um die Funktion bzw. die Wirkung des technischen Systems und in der nächsten Ebene um dessen Wirkprinzip⁷³. Eine Klassifizierung nach der Funktion kann auf den Ebenen der Systemelemente und der Teilsysteme durchgeführt werden und erleichtert die Übernahme von bestehenden technischen Systemen.

Für den Einsatz der Klassifikationen in dem Vorgehensmodell aus Kapitel 4.3 sind in diesen neben Informationen über die Funktionen und Eigenschaften der Systemelemente auch Informationen über deren Wirkflächen zur Umgebung abzubilden. Diese Betrachtungsweise lässt sich auf den Systembegriff aus der Systemtechnik⁷⁴ zurückführen, wonach ein System über seine Schnittstellen Stoff-, Energie- und Informationsflüsse austauscht, die entsprechend der Funktionen von der Eingangsschnittstelle zur Ausgangsschnittstelle verändert werden. Dies entspricht der Strukturierung von Objekten, wie sie in objektorientierten Sprachen eingesetzt wird⁷⁵.

⁷³ Hubka 1984 - S.84-85

⁷⁴ Patzak 1982

⁷⁵ Mikkola 2001

5.2 Klassifizierungsschema für Einzel- und Mehrfachgelenke

Hochintegrierte mechatronische Systeme humanoider Roboter verfügen über einen mechanischen Anteil in Form eines seriell aufgebauten Mehrkörpersystems. Die gewünschte Kinematik des Mehrkörpersystems ist mit gelenkig verbundenen Tragstrukturen aufzubauen. Nachfolgend wird dargestellt, welche Möglichkeiten bestehen, die Einzel- oder Mehrfachgelenke unter Berücksichtigung bestimmter Voraussetzungen technisch umzusetzen.

5.2.1 Voraussetzungen für die hier eingesetzten Gelenke

Menschliche Gelenke bieten einen Bewegungsraum und verfügen über kinematische Eigenschaften, die in Technischen Gelenken nicht oder nur schwer abzubilden sind. Im Folgenden wird dargestellt, über welche Eigenschaften die Gelenke des hier zu entwickelnden humanoiden Roboters verfügen.

Bei den wichtigsten Gelenken in der Robotik handelt es sich um Drehgelenke und prismatische Lineargelenke⁷⁶. Lineargelenke werden zumeist eingesetzt, um das Robotergreifsystem an seinen Einsatzort zu manövrieren, an dem die Aktionen über Drehgelenke ausgeführt werden. Für eine bessere Regelbarkeit des Roboters werden die Bewegungen der hier eingesetzten Gelenke auf eine Rotation beschränkt, die nicht von einer Translationsbewegung überlagert wird. Dies ist in Abgleich mit den Bewegungen des Menschen zulässig, da diese nur einen geringen translatorischen Anteil enthalten. Eine Beschränkung auf rotatorische Bewegungen hat zur Folge, dass sich die Lage des Drehpunkts relativ zu den Körperachsen der beiden zueinander beweglichen Tragstrukturen durch eine Bewegung des Gelenks nicht ändert (Abbildung 5.2-1).

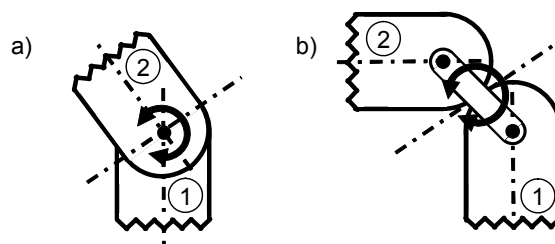


Abbildung 5.2-1: a) Reine Drehbewegung; b) Drehbewegung mit überlagelter zweiachsiger Translationsbewegung

Drehgelenke mit einem Freiheitsgrad oder Kugelgelenke mit drei Freiheitsgraden sind die Grundbausteine, aus denen die Kinematik aller Gelenke des humanoiden Roboters zusammengesetzt ist (Abbildung 5.2-2). Diese werden hier als Einzelgelenke bezeichnet.

⁷⁶ Höpler 2005

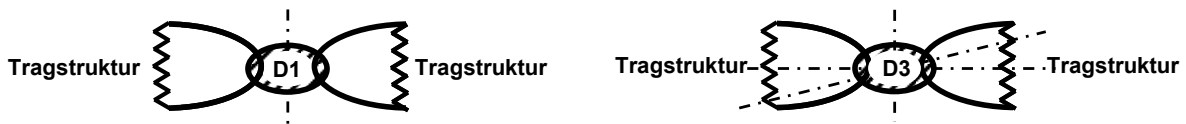


Abbildung 5.2-2: Prinzipielle Darstellung der Einzelgelenke der Mechanik humanoider Roboter; einwertiges Drehgelenk (D1) und dreiwertiges Kugelgelenk (D3)

Ein Drehgelenk mit zwei Freiheitsgraden entspricht einer Addition von zwei einwertigen Einzelgelenken. Ein Mehrfachgelenk besteht aus seriell angeordneten Einzelgelenken. Die Drehachsen der in einem Mehrfachgelenk (Abbildung 5.2-3) aufeinander folgenden Einzelgelenke sind im 90° -Winkel zueinander angeordnet und schneiden sich in einem Punkt. Diese Einschränkung ermöglicht eine Verkleinerung des Lösungsraums für Mehrfachgelenke und ist eine Restriktion, durch die eine Regelung des Mehrkörpersystems mit weniger Rechenaufwand erreicht wird. Auch die Gelenke von Industrierobotern werden in der Regel unter Beachtung dieser Bedingung aufgebaut. Die mit dieser Vereinfachung entstandene Klassenstruktur von Mehrfachgelenken verliert ihre Gültigkeit nicht, wenn zugelassen wird, dass sich die Drehachsen nicht exakt in einem Punkt schneiden, sondern einen geringen Abstand zueinander aufweisen und auch eine kleine Winkeländerung zwischen den Drehachsen konstruktiv zugelassen wird.

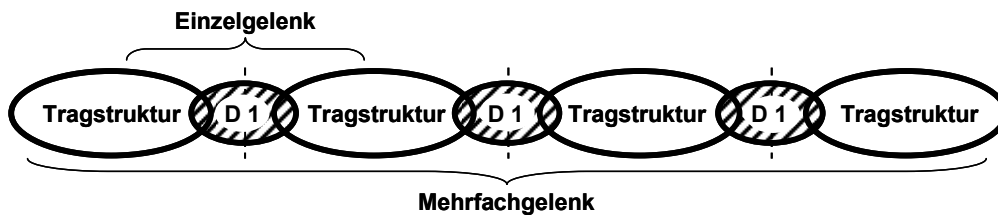


Abbildung 5.2-3: Prinzipieller Aufbau eines Mehrfachgelenks mit Einzelgelenken; die Drehachsen sind senkrecht zueinander ausgerichtet und schneiden sich in einem Punkt

Aufgrund der geforderten Ausrichtung können aufeinander folgende Drehachsen nicht koaxial verlaufen, und der Fall, dass zwei Drehachsen in einem Mehrfachgelenk koaxial sind, kann nur in bestimmten Gelenkstellungen auftreten.

Die Freiheitsgrade der hier eingesetzten Technischen Gelenke sind unabhängig voneinander zu bewegen. Hieraus folgt, dass sich eine Kopplung von zwei oder mehr Freiheitsgraden nur aus den Eigenschaften der sie antreibenden Aktorik ergibt, die eine Abhängigkeit zu der Winkelstellung eines anderen Gelenks aufweist.

5.2.2 Einzelgelenke

In diesem Kapitel werden für die hier in Frage kommenden Einzelgelenke, ausgehend von den grundlegenden Gelenkmechanismen, in einem dreistufigen Verfahren die möglichen Bauformen dieser Gelenke bestimmt. Informationen über die Bauformen der Gelenke werden benötigt, um alle Möglichkeiten zu bestimmen, wie die Einzelgelenke zu höherwertigen Gelenkkomplexen kombiniert werden können.

5.2.2.1 Grundlegende Gelenkmechanismen

Gelenke mit einem Freiheitsgrad

Allgemein sind Gelenke nach der räumlichen Lage ihrer Drehachse relativ zu einem Bezugssystem definiert. Die hierfür genutzten Bezeichnungen (Roll, Pitch, Yaw) stammen aus der Flugtechnik und bezeichnen Rotationsbewegungen, die der Rumpf eines Flugzeugs relativ zu seiner Flugrichtung ausführen kann (Abbildung 5.2-4). In der Robotik werden diese Bezeichnungen für die Drehachsen, relativ zu einem festen Koordinatensystem, genutzt.

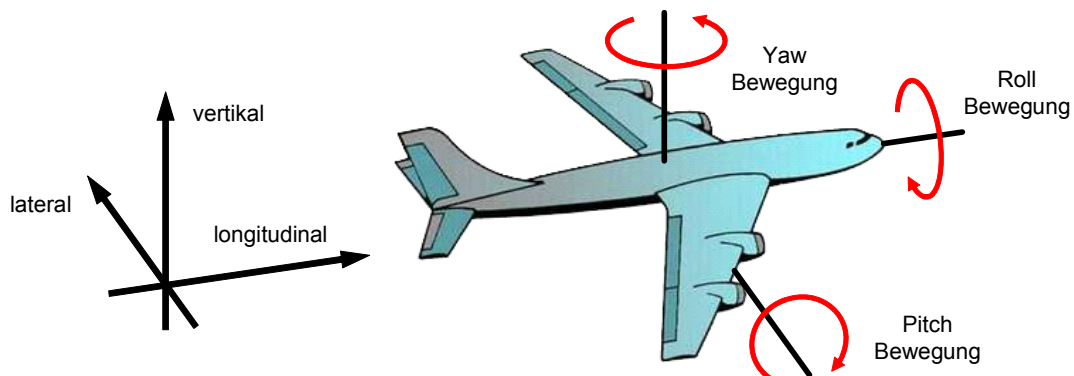


Abbildung 5.2-4: Roll-, Pitch-, Yaw-Bewegung eines Flugzeugs, relativ zur zu dessen Flugrichtung

In der Entwicklung der Robotermechanik ist es hilfreich, die Gelenke nach Kriterien zu unterteilen, die an der Funktion des Gelenks, d.h. an der Mechanik, selbst auszumachen sind. Auf diese Weise werden bei Gelenken mit einem Freiheitsgrad zwei grundlegende Gelenkmechanismen unterschieden⁷⁷. Für Gelenke mit drei Freiheitsgraden gibt es einen grundlegenden Gelenkmechanismus.

Gelenk mit einem Freiheitsgrad

Fluchtendes Gelenk (f.): Gelenk - in dem die Drehachse und die Körperachsen der Tragstrukturen koaxial verlaufen (Abbildung 5.2-5).

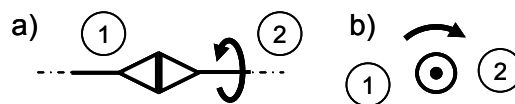


Abbildung 5.2-5: Fluchtendes Gelenk in zwei Ansichten

Nicht fluchtendes Gelenk (nf.): Gelenk - in dem die Drehachse senkrecht auf den Körperachsen der beiden Tragstrukturen steht, die sich schneiden (Abbildung 5.2-6).

⁷⁷ VDI-Richtlinie 2861

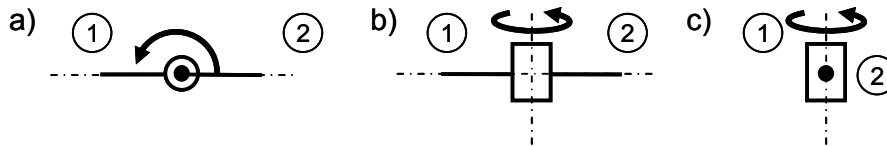


Abbildung 5.2-6: Nicht fluchtendes Gelenk in drei Ansichten

Gelenk mit drei Freiheitsgraden

Kugelgelenk (k.): Gelenk - mit drei rotatorischen Freiheitsgraden, deren Drehachsen sich in einem Punkt schneiden (Abbildung 5.2-7).

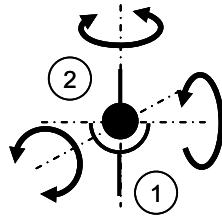


Abbildung 5.2-7: Kugelgelenk in einer Ansicht

5.2.2.2 Funktionale Darstellung der Gelenkmechanismen

Von den hier genutzten Gelenken wird gefordert, dass sie selbsthaltend sind und daher Kräfte und Momente in alle Richtungen, mit Ausnahme der Bewegungsrichtung(en) des Gelenks, aufnehmen können.

Im Folgenden werden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Einzelgelenke als Einheit dargestellt, die über zwei Wirkflächenpaare mit der Umgebung in Kontakt steht. Mithilfe von C&CM Darstellungen werden die Wirkflächenpaare bezeichnet, die Kräfte formschlüssig (senkrecht zu den Wirkflächenpaaren) und reibschlüssig (tangential zu den Wirkflächenpaaren) übertragen. In diesen schematischen Darstellungen sind alle möglichen Wirkflächenpaare enthalten, durch welche die gewünschten Gelenkbewegungen zugelassen und die unerwünschten verhindert werden (Kapitel 2.2.3.2).

Fluchtendes Gelenk (f.):

Die Achsen der beiden Leitstützstrukturen sind koaxial zu der Drehachse des Gelenks. Alle Bewegungsrichtungen werden in dem Gelenk, mit Ausnahme des rotatorischen Freiheitsgrades, von Wirkflächenpaaren blockiert (Abbildung 5.2-8).

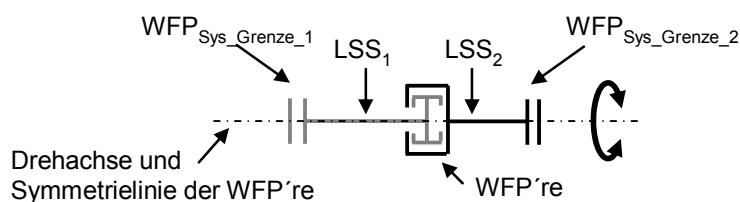


Abbildung 5.2-8: C&CM Modell eines fluchtenden Gelenks

Nicht fluchtendes Gelenk (nf.):

Die Leitstützstrukturen stehen senkrecht auf der Drehachse und schneiden sich in einem Punkt. Alle Bewegungsrichtungen in dem Gelenk werden, mit Ausnahme des rotatorischen Freiheitsgrades, durch den Einfluss von Wirkflächenpaaren geblockt. Es wird von vornherein festgelegt, dass die beiden parallel zur Drehachse ausgerichteten Wirkflächenpaare, die eine nichtfluchtende Rotation ermöglichen und Biegemomente aufnehmen, was in einer technischen Lösung mit Lagern realisiert wird, beidseitig an den Leitstützstrukturen angebracht sind und nicht einseitig oder mittig (Abbildung 5.2-9). Grund hierfür ist eine bessere Kraftaufnahme durch die beidseitige Lagerung und eine bessere Integration eines internen Durchgangs durch das Gelenk.

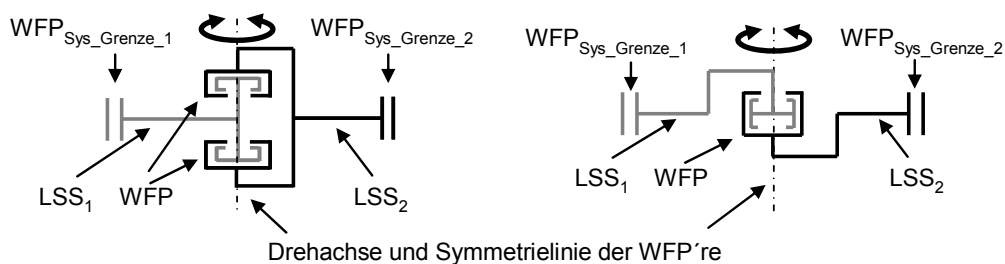


Abbildung 5.2-9: C&CM Modell eines nicht fluchtenden Gelenks; links: beidseitige Lagerung (wird hier bevorzugt); rechts: mittige Lagerung (wird hier nicht genutzt)

Kugelgelenk (k.):

Die Wirkflächenpaare verhindern alle translatorischen Bewegungen und ermöglichen alle Drehbewegungen der Leitstützstruktur 1 bezüglich der Leitstützstruktur 2 (Abbildung 5.2-10).

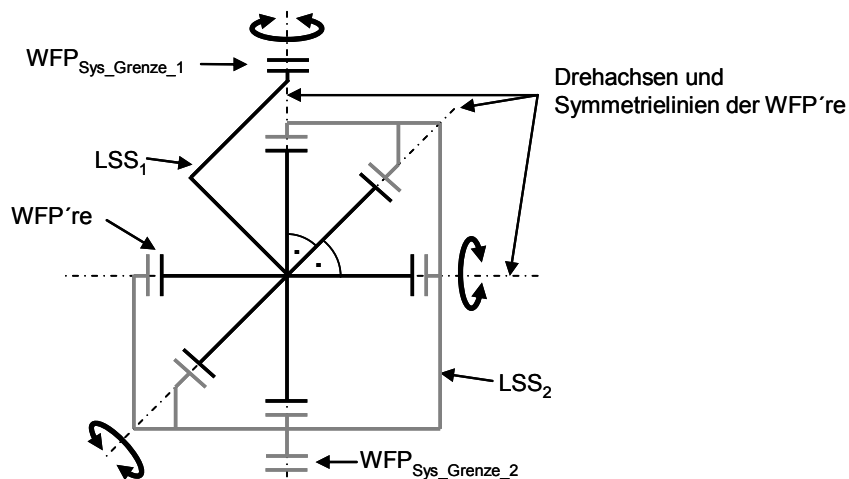


Abbildung 5.2-10: C&CM Modell eines Kugelgelenks

5.2.2.3 Bauformen der Einzelgelenke

Für eine Integration der Einzelgelenke im Mehrkörpersystem des Roboters ist entscheidend, welche geometrischen Bauformen für diese in Frage kommen. Im Folgenden werden die prinzipiellen Geometrien der Tragstrukturen der Einzelgelenke

mit den Informationen über die Wirkflächenpaare verknüpft, die sich in der funktionalen Darstellung der Gelenkmechanismen ergeben haben.

Fluchtendes Gelenk (f.):

Dieses Gelenk bietet als Einzelgelenk, aber auch als Teil eines Mehrfachgelenks, einen großen Bewegungsraum, da die beiden zueinander beweglichen Tragstrukturen in keiner Winkellage miteinander kollidieren. Das Gelenk kann entlang der Drehachse intern hohl aufgebaut werden.

Im Technischen Gelenk (Abbildung 5.2-11) ragt die eine Tragstruktur (TS_1) in die zweite (TS_2) hinein. Die Tragstrukturen und die Wirkflächenpaare sind entlang der Drehachse rotationssymmetrisch. Die Wirkflächenpaare dazwischen blockieren alle Relativbewegungen bis auf die fluchtende Rotation. Bezeichnet wird im Folgenden dieses Gelenk nach dem Schema: 1:(f.):2 oder 2:(f.):1, je nachdem in welcher Reihenfolge die Tragstrukturen angeordnet sind.

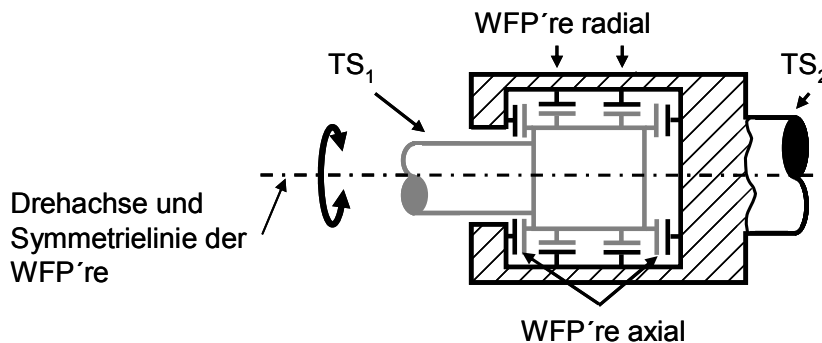


Abbildung 5.2-11: Prinzipielle Bauform eines fluchtenden Gelenks (f.)

Nicht fluchtendes Gelenk (nf.):

Der Bewegungsraum dieses Gelenks (Abbildung 5.2-12) wird durch die Geometrien der beiden Tragstrukturen eingeschränkt, die im maximalen Beugewinkel miteinander kollidieren. Die Wirkflächenpaare sind rotationssymmetrisch um die Drehachse angeordnet. Das Gelenk kann entlang der Körperachsen der Tragstrukturen intern hohl aufgebaut werden.

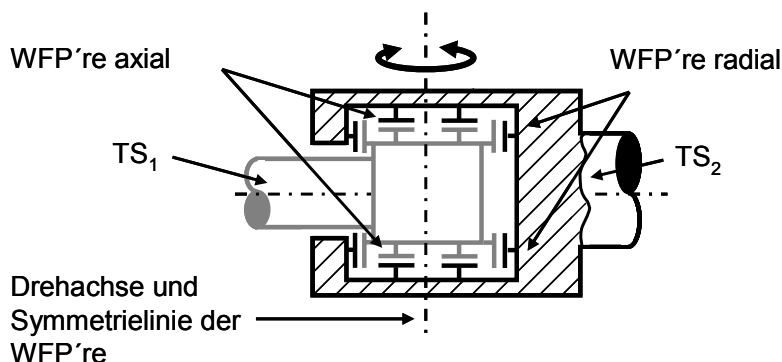


Abbildung 5.2-12: Prinzipielle Bauform eines nicht fluchtenden Gelenks (nf.)

In Technischen nicht fluchten Gelenken umschließt eine Tragstruktur (TS_2) in einer U-Form die andere (TS_1). In dem Bauraum um die Drehachse befinden sich die Wirkflächen, durch die alle Bewegungen im Gelenk, bis auf die nicht fluchtende Rotationsbewegung, blockiert werden. Bezeichnung: 1:(nf.):2 oder 2:(nf.):1, je nach Ausrichtung der Tragstrukturen.

Kugelgelenk (k.):

Die Winkelbeweglichkeit der beiden Beugebewegungen (Abbildung 5.2-13) wird durch die Ummantelung der Gelenkkugel durch die Tragstruktur (TS_1) eingeschränkt, mit der die Tragstruktur (TS_2) in den Extremstellungen kollidiert. Für den Bewegungsraum der Rotation der Abtriebswelle gibt das Gelenk keine Einschränkungen vor. Zwischen den Tragstrukturen befinden sich die Wirkflächenpaare, mit denen die Relativbewegungen der Tragstrukturen zueinander auf drei Drehbewegungen begrenzt werden. Bezeichnung 1:(k.):2 oder 2:(k.):1, je nach Ausrichtung der Tragstrukturen.

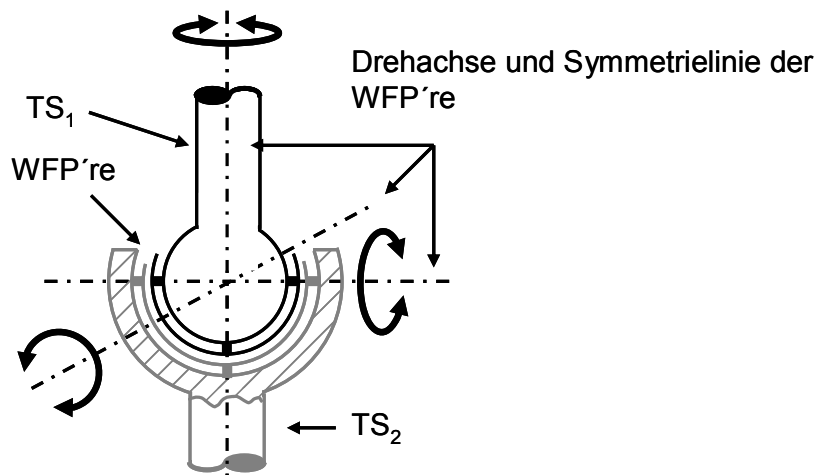


Abbildung 5.2-13: Prinzipielle Bauform eines Kugelgelenks (k.)

In dem Klassierungsschema in Tabelle 5.2-1 sind die Bauformen der Einzelgelenke zusammengefasst.

	Einzelgelenk		
Anzahl DoF	1 DoF		3 DoF
Bezeichnung	fluchtendes Gelenk	nicht fluchtendes Gelenk	Kugelgelenk
Bauform (Abk.)	(f.)	(nf.)	(k.)

Tabelle 5.2-1: Klassenschema Einzelgelenke

5.2.3 Kombination von Einzelgelenken zu Mehrfachgelenken

Unter Berücksichtigung der Voraussetzungen aus Kapitel 5.2.1 lassen sich die Einzelgelenke, deren mögliche Gestalt sich in Kapitel 5.2.2.3 ergeben hat, zu Mehrfachgelenken kombinieren. Die Mehrfachgelenke sind im Folgenden nach der Anzahl und der Art der eingesetzten Einzelgelenke gegliedert. Die Kombinationsmög-

lichkeiten sind tabellarisch aufgeführt. Im Anschluss an jede Tabelle werden die Kombinationen empfohlen, die im Vergleich mit den anderen Kombinationen über einen größeren Bewegungsraum verfügen oder eine bessere Massenverteilung besitzen oder die Möglichkeit für die Integration einer internen Kabelführung bieten. Die Massenverteilung richtet sich nach der Anordnung der Einzelgelenke in der kinematischen Kette des Roboterarms. Es ist anzustreben, massebehaftete Anteile der Einzelgelenke nahe der Basis des Mehrfachgelenks anzubringen und nach Möglichkeit an einem Ort, der sich bei den Bewegungen des Einzelgelenks nicht mitbewegt. Daher ist die Ausrichtung des Mehrfachgelenks relativ zur Basis bei den empfohlenen Kombinationen mit angegeben. Bei den in der Robotik in der Regel eingesetzten Mehrfachgelenken handelt es sich um die hier empfohlenen. Diese werden in 3D-Prinzipskizzen dargestellt. Die Wirkflächenpaare, die sich im Inneren der Einzelgelenke befinden und in den Handskizzen nicht dargestellt sind, entsprechen denen aus Kapitel 5.2.2.3.

5.2.3.1 Kombination von zwei einwertigen Einzelgelenken zu einem Mehrfachgelenk mit zwei Freiheitsgraden

Die Abkürzungen, die in den folgenden Tabellen genutzt werden, beziehen sich auf die Bauform der Einzelgelenke und in welcher Orientierung diese aneinandergereiht werden. Die beiden Tragstrukturen am Gelenk sind mit 1 oder 2 bezeichnet (siehe Abbildung 5.2-11, Abbildung 5.2-12 und Abbildung 5.2-13).

Kombination von zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken (Kreuzgelenk)

Zwei nicht fluchtende Einzelgelenke werden zu einem zweiwertigen Mehrfachgelenk zusammengesetzt. Die Einzelgelenke können in zwei Orientierungen miteinander kombiniert werden (Tabelle 5.2-2). Dieses Mehrfachgelenk entspricht einem Kreuzgelenk.

<i>Kombinationen aus zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken (Kreuzgelenk)</i>	
<i>2:(nf.):1+1:(nf.):2</i>	<i>2:(nf.):1+2:(nf.):1</i>

Index: (Komponente der Tragstruktur):(Bauform Einzelgelenk):(Komponente der Tragstruktur).

Tabelle 5.2-2: Mehrfachgelenk mit zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken

Bei der Kombination, die aufgrund der Massenverteilung zu empfehlen ist, handelt es sich um das Mehrfachgelenk $2:(nf.):1+2:(nf.):1$, in dem beide nicht fluchtenden Gelenke so kombiniert werden, dass ihre größeren Tragstrukturen (2) näher zur Basis angebracht sind (Abbildung 5.2-14, Kombination a). Die andere Kombination dieses Mehrfachgelenks $2:(nf.):1+1:(nf.):2$ ist aufgrund der großen Winkelbeweglichkeit zu empfehlen (Abbildung 5.2-14; Kombination b). Weiterhin benötigt dieses Mehrfachgelenk nur einen kleinen Bauraum und ein zentraler Kabelkanal kann hindurchgeführt werden.

Kombination a): Hervorzuheben aufgrund der Massenverteilung.

Kombination b): Hervorzuheben aufgrund des Bewegungsraums, des Bauraums und der internen Gelenkstruktur.

a) Kombination: $2:(nf.):1+2:(nf.):1$

b) Kombination: $2:(nf.):1+1:(nf.):2$

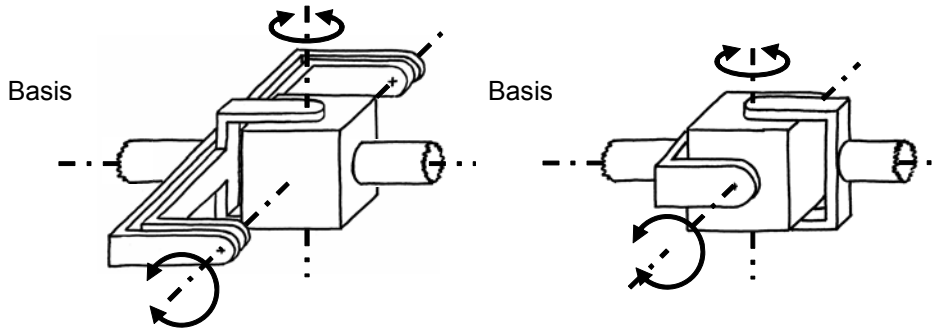


Abbildung 5.2-14: Hervorzuhebende Kombinationen eines zweiwertigen Mehrfachgelenks aus zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken

Kombination aus einem fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk

Ein fluchtendes Einzelgelenk und ein nicht fluchtendes Einzelgelenk werden zu einem zweiwertigen Mehrfachgelenk zusammengesetzt. Diese beiden Einzelgelenke können auf vier unterschiedliche Weisen miteinander kombiniert werden (Tabelle 5.2-3).

Kombination aus	<i>Kombinationen aus einem fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk</i>			
(f.) und (nf.)	$2:(f.):1+1:(nf.):2$	$2:(f.):1+2:(nf.):1$	$2:(nf.):1+2:(f.):1$	$1:(nf.):2+2:(f.):1$

Index: (Komponente der Tragstruktur):(Bauform Einzelgelenk):(Komponente der Tragstruktur).

Tabelle 5.2-3: Mehrfachgelenke aus einem fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk

Der Bauraum und die Winkelbeweglichkeit sind in allen Varianten in etwa gleich groß. Zwei Kombinationen werden aufgrund ihrer Massenverteilung hervorgehoben und unterscheiden sich bezüglich der Reihenfolge (Abbildung 5.2-15), in der das fluchtende und das nicht fluchtende Gelenk in der kinematischen Kette hintereinander angeordnet sind.

Kombination a): Das fluchtende Gelenk ist näher zur Basis angebracht.

Kombination b): Das nicht fluchtende Gelenk ist näher zur Basis angebracht.

a) Kombination: $2:(f.):1+2:(nf.):1$

b) Kombination: $2:(nf.):1+2:(f.):1$

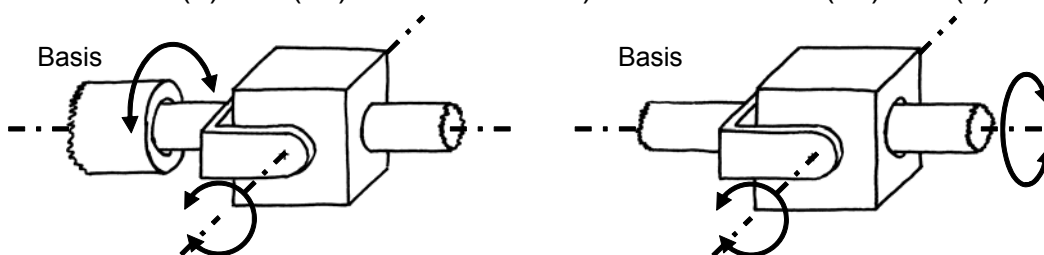


Abbildung 5.2-15: Hervorzuhebende Kombinationen eines zweiwertigen Mehrfachgelenks aus einem fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk

5.2.3.2 Kombination von drei einwertigen Einzelgelenken zu einem Mehrfachgelenk mit drei Freiheitsgraden

Kombination aus einem fluchtenden und zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken

Ein fluchtendes Einzelgelenk und zwei nicht fluchtende Einzelgelenke werden zu einem dreiwertigen Mehrfachgelenk zusammengesetzt. Dies entspricht einer Kombination zweier nicht fluchtender Gelenke, die in Tabelle 5.2-2 beschrieben sind, mit einem fluchtenden Gelenk (Tabelle 5.2-4), also einem Kreuzgelenk, an dem an einer Seite ein Roll-Gelenk angebracht ist.

Mehrfachgelenken aus Tabelle 5.2-2	<i>Kombination aus einem fluchtenden und zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken (Kreuzgelenk mit einem fluchtenden Gelenk)</i>	
2:(nf.):1+1:(nf.):2	2:(nf.):1+1:(nf.):2+1:(f.):2	2:(nf.):1+1:(nf.):2+2:(f.):1
2:(nf.):1+2:(nf.):1	2:(nf.):1+2:(nf.):1+1:(f.):2	2:(f.):1+2:(nf.):1+2:(nf.):1
	2:(nf.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1	1:(f.):2+2:(nf.):1+2:(nf.):1

Index: (Komponente der Tragstruktur):(Bauform Einzelgelenk):(Komponente der Tragstruktur) – Das Einzelgelenkpaar, das sich in einer Zeile nicht ändern, ist in der linken Spalte aufgetragen.

Tabelle 5.2-4: Mehrfachgelenke aus einem fluchtenden und zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken

Zwei Mehrfachgelenke, bei denen die Komponente der Tragstruktur 2 näher an der Basis angebracht sind, werden aufgrund ihrer Massenverteilung hervorgehoben (Abbildung 5.2-16). Unterschied besteht in der Reihenfolge der Drehachsen.

Kombination a): Das fluchtende Gelenk ist näher zur Basis angebracht.

Kombination b): Das nicht fluchtende Gelenk ist näher zur Basis angebracht.

a) Kombination:

$$2:(f.):1+2:(nf.):1+2:(nf.):1$$

b) Kombination:

$$2:(nf.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1$$

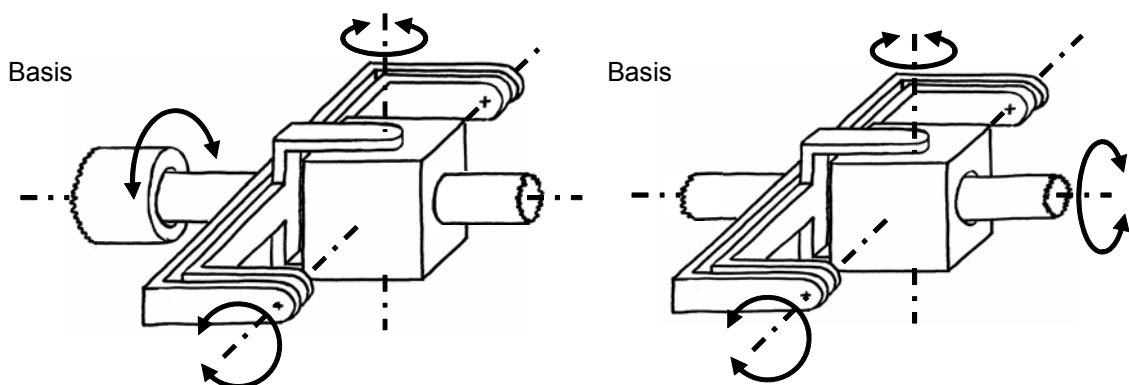


Abbildung 5.2-16: Hervorzuhebende Kombinationen eines dreiwertigen Mehrfachgelenks aus einem fluchtenden und zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken

Zwei weitere Mehrfachgelenke sind aufgrund ihrer Winkelbeweglichkeit und der möglichen Integration von einem Kabelkanal hervorzuheben (Abbildung 5.2-17). Hierbei ist ebenfalls die Reihenfolge in der Anordnung zu beachten.

Kombination a): Das fluchtende Gelenk ist näher zur Basis angebracht.

Kombination b): Das Kardangelenke ist näher zur Basis angebracht.

a) Kombination:

$$2:(f.):1+2:(nf.):1+1:(nf.):2$$

b) Kombination:

$$2:(nf.):1+1:(nf.):2+2:(f.):1$$

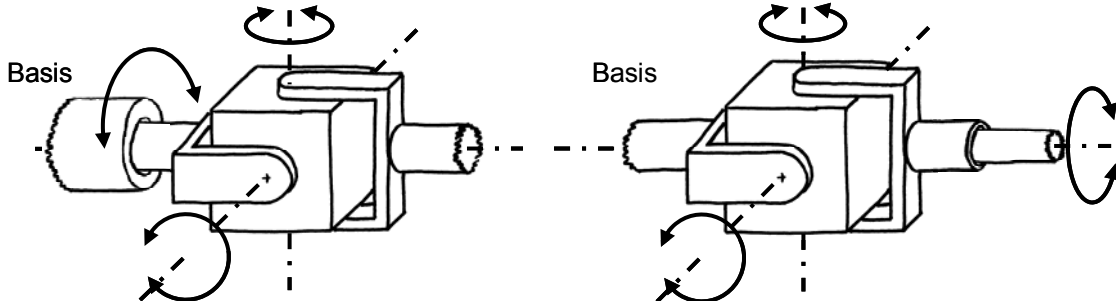


Abbildung 5.2-17: Hervorzuhebende Kombination eines dreiwertigen Mehrfachgelenks aus einem fluchtenden und zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken

Kombination von zwei fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk

Zwei fluchtende Einzelgelenke und ein nicht fluchtendes Einzelgelenk werden zu einem dreiwertigen Mehrfachgelenk zusammengesetzt. In diesem Mehrfachgelenk sitzt mittig zwischen den beiden fluchtenden Gelenken das nicht fluchtende Gelenk (Tabelle 5.2-5). Aufgrund der guten Winkelbeweglichkeit aller drei Einzelgelenke, die sich gegenseitig nicht behindern, wird diese Art eines dreiwertigen Mehrfachgelenks oft als Schultergelenk humanoider Roboter eingesetzt.

Kombinationen mit	Kombination aus zwei fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk	
2:(f.):1+1:(nf.):2	2:(f.):1+1:(nf.):2+2:(f.):1	2:(f.):1+1:(nf.):2+1:(f.):2
1:(f.):2+1:(nf.):2	1:(f.):2+1:(nf.):2+2:(f.):1	1:(f.):2+1:(nf.):2+1:(f.):2
2:(f.):1+2:(nf.):1	2:(f.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1	2:(f.):1+2:(nf.):1+1:(f.):2
1:(f.):2+2:(nf.):1	1:(f.):2+2:(nf.):1+2:(f.):1	1:(f.):2+2:(nf.):1+1:(f.):2

Index: (Komponente der Tragstruktur):(Bauform Einzelgelenk):(Komponente der Tragstruktur).

Tabelle 5.2-5: Mehrfachgelenk aus zwei fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk

Bei der aufgrund der Massenverteilung zu empfehlenden Kombination für dieses Mehrfachgelenk handelt es sich um die Kombination 2:(f.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1 (Abbildung 5.2-18).

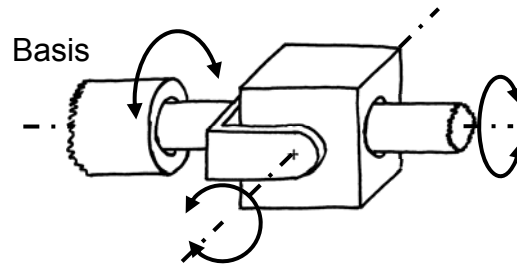


Abbildung 5.2-18: Hervorzuhebende Kombination eines dreiwertigen Mehrfachgelenks aus einem fluchtenden, einem nicht fluchtenden und einem fluchtenden Einzelgelenk

5.2.3.3 Kombination von vier einwertigen Einzelgelenken zu einem Mehrfachgelenk mit vier Freiheitsgraden

Ein Körper kann in einem Punkt um maximal drei Achsen gedreht werden. Eine solche dreiwertige Bewegung ermöglicht ein Kugelgelenk. Ein mögliches Ersatzgelenk für ein Kugelgelenk besteht aus drei hintereinander geschalteten einwertigen Gelenken, deren Drehachsen sich in einem Punkt schneiden. Ein Ersatzgelenk, das aus vier hintereinander geschalteten einwertigen Gelenken besteht, deren Drehachsen sich in einem Punkt schneiden, ist in seinen Bewegungen redundant, bietet aber in Bezug auf die Winkelbeweglichkeit Vorteile gegenüber einem Ersatzgelenk mit drei einwertigen Gelenken. Dies liegt daran, dass Einzelgelenke in einem Ersatzgelenk mit drei getrennten Freiheitsgraden schnelle Bewegungen durchführen müssen, wenn die Drehachsen von zwei Einzelgelenken nahe an der Position vorbeigeführt werden, in der sie coaxial zueinander sind („Joint Flipping“). Solche Umoorientierungen müssen umso schneller durchgeführt werden, je näher sich die Drehachsen kommen, und können dabei das Gelenk beschädigen. Ein Mehrfachgelenk mit vier Drehachsen bietet die Möglichkeit, solche Bewegungen ohne Umoorientierung durchzuführen. Bei einem vierwertigen Gelenk, das aus hintereinander geschalteten einwertigen Gelenken besteht, erfüllt nur eine Kombination in der Reihenfolge fluchtendes, nicht fluchtendes, nicht fluchtendes und fluchtendes Gelenke die Bedingung, dass sich die Drehachsen in einem Punkt schneiden und seriell im rechten Winkel aufeinander stehen (Kapitel 5.2.1). Die beiden nicht fluchtenden Gelenke werden, wie in Tabelle 5.2-2 beschrieben, miteinander kombiniert, und an beiden Seiten wird ein fluchtendes Gelenk angebracht (Tabelle 5.2-6). Dieses Mehrfachgelenk entspricht einem Kreuzgelenk mit zwei beidseitig angeschlossenen fluchtenden Gelenken.

Kombinationen mit Mehrfachgelenken aus Tabelle 5.2-2	Serienschaltung von einem fluchtenden, zwei nicht fluchtenden und einem fluchtenden Einzelgelenk			
2:(nf.):1+1:(nf.):2	1:(f.):1+2:(nf.):1+ +1:(nf.):2+1:(f.):2	2:(f.):1+2:(nf.):1+ +1:(nf.):2+2:(f.):1	1:(f.):2+2:(nf.):1+ +1:(nf.):2+2:(f.):1	
2:(nf.):1+2:(nf.):1	2:(f.):1+2:(nf.):1+ +2:(nf.):1+1:(f.):2	2:(f.):1+2:(nf.):1+ +2:(nf.):1+2:(f.):1	1:(f.):2+2:(nf.):1+ +2:(nf.):1+1:(f.):2	1:(f.):2+2:(nf.):1+ +2:(nf.):1+2:(f.):1

Index: (Komponente der Tragstruktur):(Bauform Einzelgelenk):(Komponente der Tragstruktur) – Die Einzelgelenke, die sich in einer Zeile nicht ändern, sind mit dicker Schrift eingetragen.

Tabelle 5.2-6: Mehrfachgelenke aus vier einwertigen Einzelgelenken

Die beiden zu empfehlenden Kombinationen unterscheiden sich bezüglich des mittig eingesetzten Kardangelenks, für das die beiden Varianten genutzt werden, die auch für das Kardangelenk Vorteile bieten (s.o.) (Abbildung 5.2-19).

Kombination a): Das Kardangelenk ist aufgrund der Massenverteilung zu empfehlen.

Kombination b): Das Kardangelenk ist aufgrund der Beweglichkeit, des Bauraums und der Kabelführung zu empfehlen.

a) Kombination:

$$2:(f.):1+2:(nf.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1$$

b) Kombination:

$$2:(f.):1+2:(nf.):1+1:(nf.):2+2:(f.):1$$

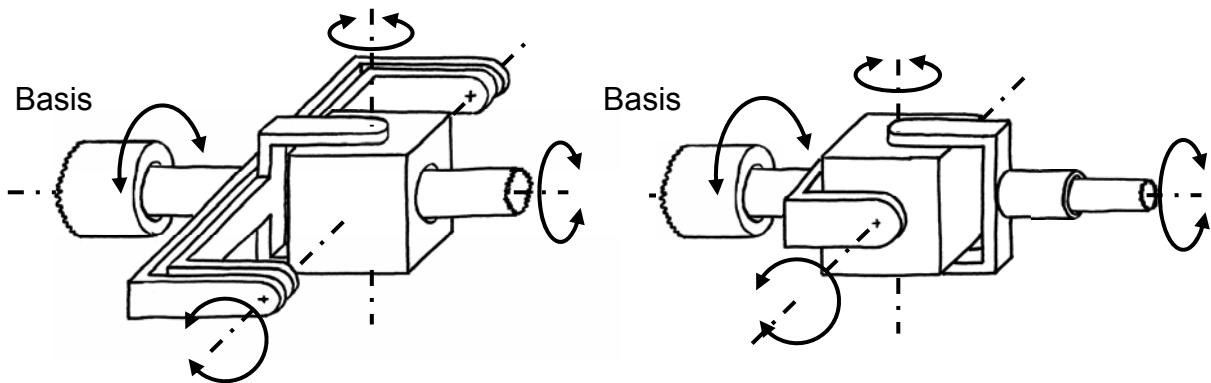


Abbildung 5.2-19: Hervorzuhebende Kombination eines vierwertigen Mehrfachgelenks aus einem fluchtenden, zwei nicht fluchtenden und einem fluchtenden Einzelgelenk

5.2.3.4 Kombination eines dreiwertigen Einzelgelenks mit einem einwertigen Einzelgelenk zu einem Mehrfachgelenk mit vier Freiheitsgraden

Es existiert keine Kombination aus einem einwertigen Einzelgelenk und einem dreiwertigen Kugelgelenk, in der die aufeinander folgenden Drehachsen im rechten Winkel aufeinander stehen und sich in einem Punkt schneiden.

5.3 Klassifikation der Aktorik

Die Funktionalität und die Eigenschaften der Funktionseinheit Aktorik werden durch die Funktionalitäten und Eigenschaften der Systemelemente bereitgestellt, die

zusammen in der Aktorik integriert sind. In der Konzeption der Aktorik ist sicherzustellen, dass die Bewegungen des Roboters über die geforderten Eigenschaften verfügen. Hierbei handelt es sich um die Leistungsfähigkeit der Antriebe und das dynamische Verhalten der Gelenke. Allgemein steht für die Integration der Aktorik in das mechanische System der Gelenke nur ein geringer Bauraum zur Verfügung und die Aktorik soll über eine möglichst geringe Masse verfügen.

Die Aktorik setzt sich aus Systemelementen zusammen, die Primärenergie in mechanische Energie wandeln und aus Systemelementen, mit denen die mechanische Energie zu dem anzutreibenden Gelenk übertragen wird.

5.3.1 Systemelemente der Aktorik

Die Bewegungen der Gelenke werden von Kraftmaschinen angetrieben, die nach Isermann⁷⁸ eine Primärenergie in mechanische Energie umsetzen. Janocha⁷⁹ definiert Aktoren als die Verbindungsglieder zwischen dem informationsverarbeitenden Teil einer elektrischen Steuerung und einem Prozess. Damit Aktoren über die notwendige Systemfähigkeit verfügen, wird der Aktoreingang stets elektrisch, im Idealfall leistungslos, angesteuert⁷⁹. Diese Definition ermöglicht eine Betrachtung des Antriebs als ein geschlossenes System, welches mit seiner Umgebung über Schnittstellen kommuniziert. Des Weiteren beschreibt Janocha die funktionale Struktur von Aktoren durch die Einführung der Funktionsglieder „Energisteller“ und „Energiewandler“, die beide eine Energie als Eingangsgröße und eine Energie als Ausgangsgröße haben (Abbildung 5.3-1).

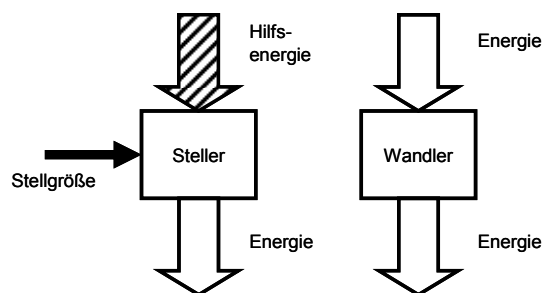


Abbildung 5.3-1: Energisteller und Energiewandler⁸⁰

Die Eingangsgröße des „Energistellers“ ist eine Hilfsenergie, bei der es sich um die als Energiequelle genutzte primäre Energie handelt. Der Energiefluss wird mit einer Stellgröße gesteuert. Ein Energiewandler wandelt die eingehende Energie in die ausgehende um und hat auf den Energiefluss keinen Einfluss. Die eingehende und die

⁷⁸ Isermann 1999 – S.205

⁷⁹ Janocha 1992- S.1-11

⁸⁰ Janocha 1992 – S.2

ausgehende Energie können von der gleichen Art sein, wie z.B. bei einem Drehmomentenwandler, oder von unterschiedlicher, wie z.B. in einem hydraulischen Zylinder. Die Eingangsgröße des Wandlers ist keine Hilfsenergie.

Bei dieser Unterteilung ist der Fall zu beachten, dass die Hilfsenergie der primären Energiequelle von einem primären Energiesteller in eine sekundäre Energieform umgewandelt wird, dies aber keinen direkten Einfluss auf die Aktionen der angetriebenen Freiheitsgrade hat. Diese sekundäre Energieform wird dann einem sekundären Steller zugeführt, der den Antrieb der angesteuerten Freiheitsgrade bewirkt. Ein Beispiel hierfür ist ein Kompressor, der als primärer Steller mithilfe von Strom als primäre Energiequelle Luft in einem Druckbehälter komprimiert, die dann als Energiequelle für alle angeschlossenen Freiheitsgrade dient. Die Gelenke werden über Druckleitungen angesteuert und der Luftstrom über Ventile eingestellt, bei denen es sich um die sekundären Steller handelt. Die Ventile erhalten über eine Stellgröße die Informationen zur Regulierung des Volumenstroms. Die Unterteilung der Aktorik in Systemelemente ist in Abbildung 5.3-2 dargestellt. Dem Steller wird in dieser Betrachtung noch eine weitere primäre Energie zugeführt. Dies ist der Fall, wenn die Energieform, die vom Steller in eine mechanische Energieform gewandelt wird, für den Betrieb des Stellers nicht genutzt werden kann. Ein Beispiel ist ein pneumatisches Ventil, das Strom benötigt, um einen Volumenstrom zu ändern.

Im Weiteren wird die Aktorik in die Anteile Aktor und Antriebsstrang aufgeteilt. Bei den Aktoren handelt es sich um Steller, die eine Hilfsenergie und eine elektrische Stellgröße als Eingang und eine mechanische, bzw. fluidische Energie als Ausgangsgröße haben, die einem Einzelgelenk zugeordnet ist. Der Antriebsstrang besteht aus Wandlern, von denen die Ausgangsgröße der Aktoren zu den Einzelgelenken übertragen wird und an diese in Form einer mechanischen Energie abgegeben wird.

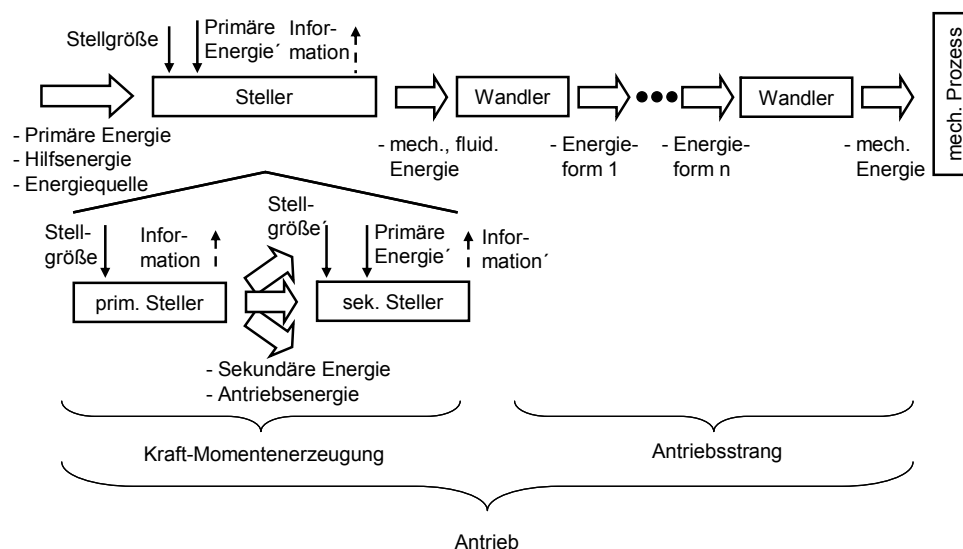


Abbildung 5.3-2: Unterteilung der Aktorik in Systemelemente

5.3.2 Arten von Antriebssträngen

In seiner Funktion als Wandler überträgt der Antriebsstrang die Antriebsleistung vom Aktor zum Gelenk. Er besteht aus einem oder mehreren hintereinander angeordneten Systemelementen, die für sich wiederum die Funktion eines Wandlers erfüllen. Für die Konzeption des Antriebsstrangs ist es notwendig, die Varianten zu beschreiben, wie die Kinematik des Roboters angetrieben werden kann und welche Voraussetzungen der Antriebsstrang hierfür erfüllen muss. Es existieren zwei prinzipiell unterschiedliche Möglichkeiten, ein Gelenk in einer seriellen Kinematik anzutreiben. Diese beiden Antriebsmöglichkeiten werden hier als Gelenkantrieb und als führender Antrieb bezeichnet. Ein Gelenkantrieb überträgt die Antriebsleistung zu dem anzutreibenden Gelenk. Der Antriebsstrang ist an der Tragstruktur der seriellen Kinematik angebracht und passt sich diesem an. Dies bedeutet, dass ein Antriebsstrang, der in der Tragstruktur die Antriebsleistung über ein Gelenk hinweg überträgt, sich dessen Bewegungen passiv anpasst. Ein führender Antrieb besitzt eine eigene Mechanik, die von der geführten Mechanik des Roboters unabhängig ist und an zwei Orten über Wirkflächenpaare mit der Mechanik des Roboters verbunden ist. Zwischen diesen beiden Stellen befinden sich passive Gelenke des Roboters, die von der führenden Mechanik von außen bewegt werden. Der Antrieb führt die Gelenke des Roboters sozusagen in die neue Position.

Im Folgenden werden die beiden prinzipiellen Antriebsmöglichkeiten weiter aufgeteilt und jeweils mit Beispielen verdeutlicht.

5.3.2.1 Gelenkantrieb

Gelenkantriebe können so aufgebaut sein, dass sie separat ein Einzelgelenk antreiben oder dass zwei Antriebsstränge von zwei Aktoren miteinander gekoppelt sind und Bewegungen der beiden angetriebenen Gelenke nicht unabhängig voneinander zu betrachten sind. Diese beiden Fälle werden hier als separater Gelenkantrieb und gekoppelter Gelenkantrieb bezeichnet.

Separater Gelenkantrieb

Das Gelenk verfügt über einen eignen Antrieb, der einen aktiven antreibenden Freiheitsgrad und eventuell mehrere passive aufweist. Diese passiven Freiheitsgrade können in der Aufhängung des Aktors oder im Antriebsstrang enthalten sein (siehe Abbildung 5.3-3).

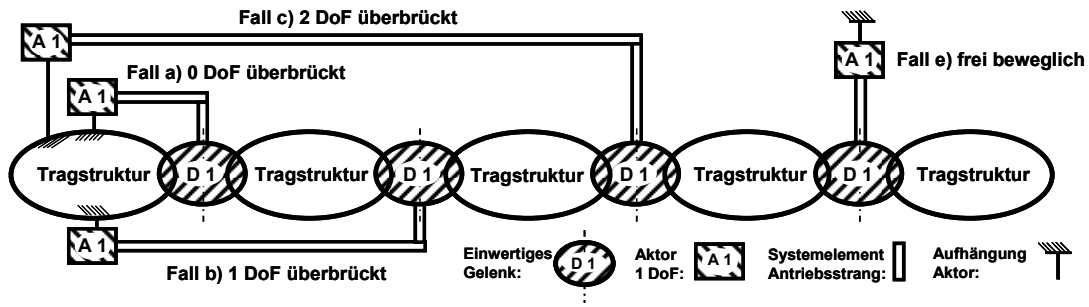


Abbildung 5.3-3: Schema eines separaten Gelenkantriebs

Es sind die in Abbildung 5.3-3 dargestellten Fälle a) bis e) zu unterscheiden:

Fall a) Der Aktor ist an der Tragstruktur neben dem Gelenk angebracht. Dieser Antrieb wird durch keine Bewegung eines anderen Gelenks beeinflusst und ist daher stets unabhängig. Hierbei handelt es sich um eine häufig gewählte Antriebsvariante.

Beispiel: Bei dem in Abbildung 5.3-4 dargestellten Mehrfachgelenk handelt es sich um ein Kardangelenke mit einem nachgeschalteten fluchtenden Gelenk (Abbildung 5.2-16; hervorgehobene Kombination b) 2:(nf.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1).

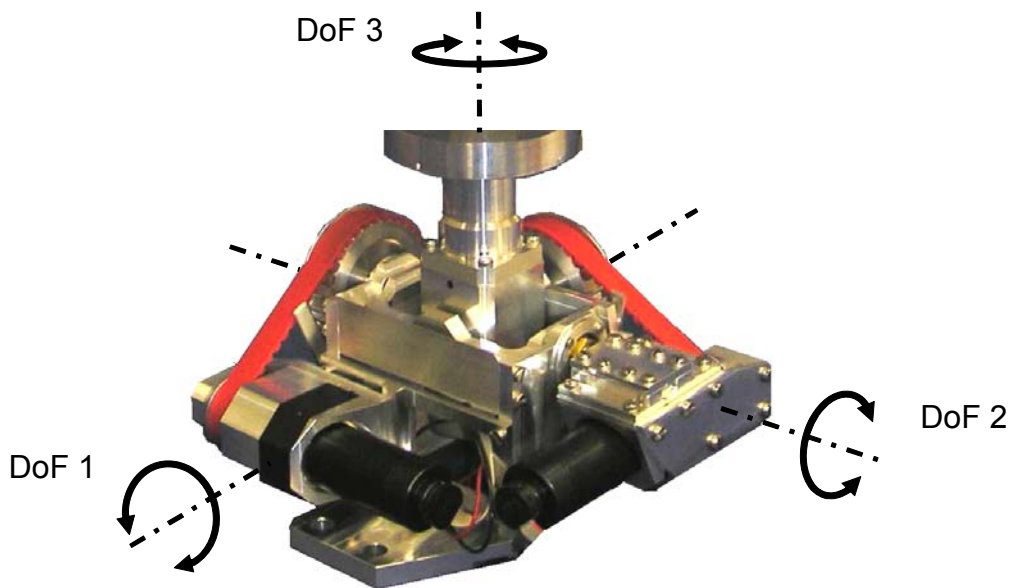


Abbildung 5.3-4: Beispiel für drei separate Gelenkantriebe, die keinen Freiheitsgrad überbrücken (siehe Kapitel 8.2.2, Hals II)

Die Antriebe sind jeweils an der Tragstruktur neben dem Gelenk angebracht, ohne dabei einen Freiheitsgrad zu überbrücken. Die Bewegungen sind voneinander unabhängig. Die in der seriellen Reihenfolge nachgeschalteten Antriebe werden von den übergeordneten mitbewegt.

Fall b) Der Aktor ist auf eine Komponente der Tragstruktur montiert und treibt den übernächsten Freiheitsgrad an. Der Antriebsstrang überbrückt ein Gelenk und ist dabei von dessen Bewegungen abhängig oder unabhängig.

Beispiel: Ein frei verlaufender Seilzug wird über eine Umlenkrolle durch ein nicht fluchtendes Gelenk geführt (Abbildung 5.3-5). Die Position des Seilzuges wird durch die Winkelstellung des überbrückten Gelenks beeinflusst und ist damit von dessen Gelenkstellung abhängig.

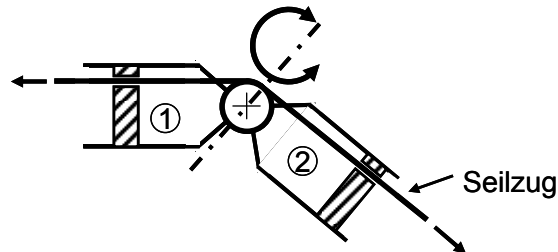


Abbildung 5.3-5: Beispiel für ein Systemelement im Antriebsstrang, das eine Übertragung über einen Freiheitsgrad ermöglicht und von diesem beeinflusst wird

Fall c) Die Antriebsleistung wird über zwei Gelenke in einem Mehrfachgelenk hinweg übertragen. Im Antriebsstrang sind mindestens zwei passive rotatorische Freiheitsgrade enthalten, deren Drehachsen sich in einem Punkt schneiden. Es sind die Fälle zu unterscheiden, bei denen eine Beeinflussung des angetriebenen Freiheitsgrades aufgrund der überbrückten Drehachsen auftritt oder nicht.

Beispiel: Eine Gelenkwelle ist ein Systemelement im Antriebsstrang mit zwei passiven Freiheitsgraden. Solche Wellen existieren in verschiedenen Ausführungen, bei denen die abtriebsseitige Drehlage der Welle von den überbrückten Freiheitsgraden unabhängig ist oder eine Abhängigkeit aufweist⁸¹. Gelenkwellen ermöglichen nur kleine passive Winkelbewegungen und benötigen relativ viel Bauraum. Aus diesem Grund werden in der Robotik solche Systemelemente nur selten im Antriebsstrang eingesetzt. In Abbildung 5.3-6 ist eine Kugelgelenkwelle dargestellt, bei der die angetriebene Drehlage durch die Winkelbewegungen nicht beeinflusst wird (Gleichlaufwelle).

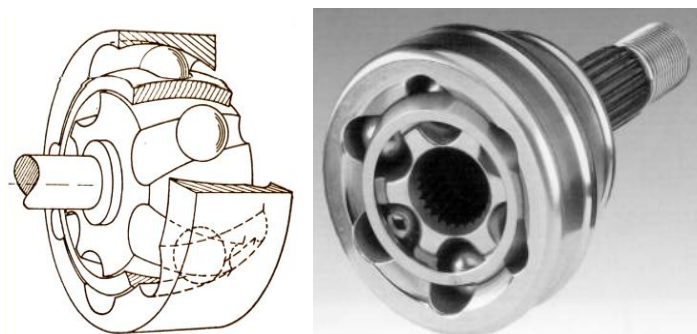


Abbildung 5.3-6: Beispiel für ein Systemelement im Antriebsstrang, mit dem über zwei Freiheitsgrade hinweg übertragen werden kann (Kugelgelenkwelle, Gleichlaufwelle)

⁸¹ Seherr-Thoss et al. 2002

Fall d) Der Fall, dass ein Antriebsstrang drei Freiheitsgrade überbrückt, ist nur möglich, wenn die Übertragung der Antriebsleistung von den passiven Bewegungen des Antriebsstrangs unabhängig ist. Bei solchen Systemelementen des Antriebsstrangs handelt es sich um frei bewegliche, was im Fall e) behandelt wird.

Fall e) Der Antrieb ist ausgelagert, und zwischen dem angetriebenen Gelenk und dem Aktor befindet sich eine beliebige Anzahl von Gelenken. Der Antriebsstrang ist im Raum frei beweglich, und die von ihm übertragene Antriebsleistung ist von den überbrückten Bewegungen unabhängig.

Beispiel: In Abbildung 5.3-7 sind zwei hydraulische Antriebsstränge und zwei Bowdenzüge dargestellt, die im Raum, in gewissen Grenzen, frei bewegt werden können. Zwischen den Aktoren, bei denen es sich um E-Motoren handelt und den flexiblen Antriebssträngen sind die Systemelemente zu erkennen, welche die Antriebsleistung in eine Form wandeln, die mit einer Hydraulik oder einem Seilzug übertragen werden kann.

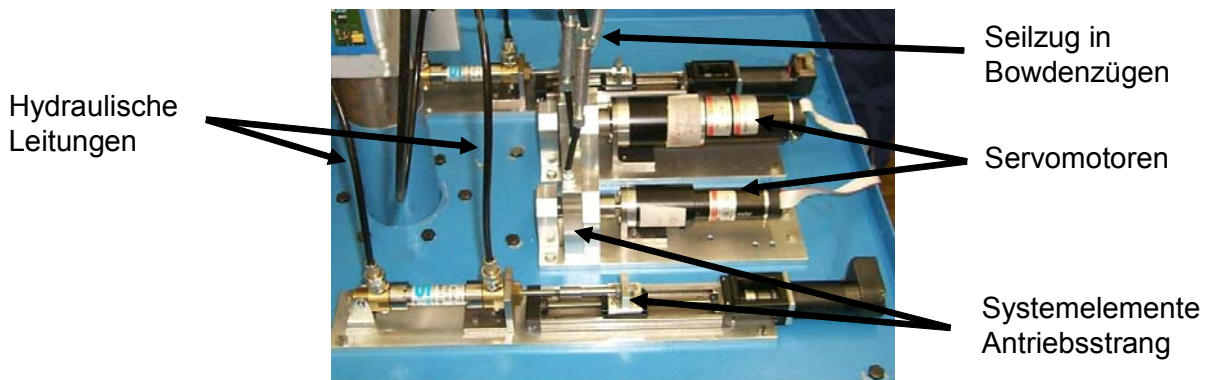


Abbildung 5.3-7: Beispiele für einen separaten Gelenkantrieb, der frei im Raum beweglich ist (Antriebe für die vier Gelenke im Ellbogen und im Handgelenk von Arm I, siehe Kapitel 8.1.1)

In Tabelle 5.3-1 sind die Klassen der Antriebsstränge von separaten Gelenkantrieben aufgeführt.

Anzahl der überbrückten Achsen	Separater Gelenkantrieb					
	0	1		2	ausgelagert	
abhängig/unabhängig	unab.	unab.	ab.	unab.	ab.	unab.

Tabelle 5.3-1: Klassen separater Gelenkantriebe

Gekoppelter Gelenkantrieb

Die Antriebsstränge von zwei Aktoren sind zwischen den angetriebenen Gelenken gekoppelt. Für die Ansteuerung der Gelenkbewegungen ist die Kopplung mit zu beachten (Abbildung 5.3-8).

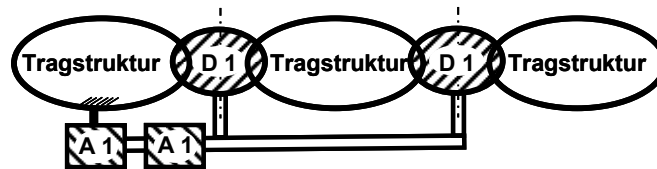


Abbildung 5.3-8: Schema eines gekoppelten Gelenkantriebs

Beispiel: Zwei Antriebe sind über ein Differential für den Antrieb eines nicht fluchtenden und eines fluchtenden Gelenks zusammengeschaltet (Abbildung 5.3-9).

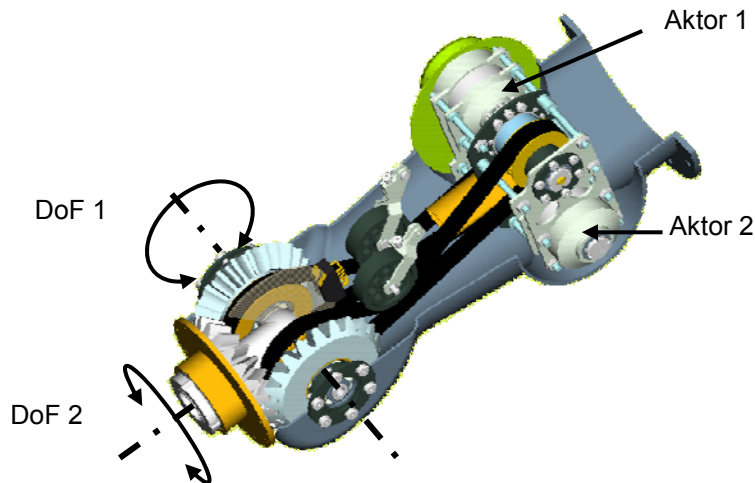


Abbildung 5.3-9: Beispiel für einen gekoppelten Gelenkantrieb (Ellbogengelenk aus einer Konzeptstudie, das mit einem Differential angetrieben wird)

Bei den gekoppelten Gelenkantrieben handelt es sich um Spezialfälle, die im Einzelnen zu betrachten sind. Daher ist es ausreichend, in einer allgemeinen Klassifikation der Antriebsstränge diese als eine Klasse einzufügen, ohne eine weitere Unterteilung vorzunehmen.

5.3.2.2 Führender Antrieb

Durch eine Bewegung der führenden Mechanik werden die passiven Gelenke der Robotermechanik in eine neue Winkelstellung geführt. Die geführte Mechanik kann über zwei oder drei passive Drehachsen verfügen. Wenn sie nur über eine verfügt, entspricht dies einem separaten Gelenkantrieb Fall a). Eventuell sind in der Kontaktstelle, zwischen der führenden Mechanik und der angetriebenen, passive Ausgleichsbewegungen notwendig, um die Bewegungen der beiden Komponenten anzupassen. D.h. es sind zwischen den beiden Tragstrukturen nur so viele Wirkflächenpaare vorhanden, dass die geführte Mechanik eindeutig bewegt werden kann.

Es werden hier nur Führungen von Gelenken betrachtet, die sich in einem Mehrfachgelenk befinden. Grund hierfür ist das optische Erscheinungsbild des humanoiden Roboters. Eine große führende Mechanik, die für eine Überbrückung von mehreren Mehrfachgelenken notwendig ist, würde dieses Erscheinungsbild stören. Die Struktur der führenden Mechanik wird hier nicht näher betrachtet, da sie frei gewählt werden

kann. Sie muss nur die Bedingung erfüllen, dass die passiven Gelenke der geführten Mechanik eindeutig angetrieben werden. In Abbildung 5.3-10 ist das Schema einer geführten Mechanik mit drei Drehachsen und einer führenden Mechanik dargestellt, die drei angetriebene Gelenke und drei passive Gelenke am Anschluss zur Tragstruktur aufweist.

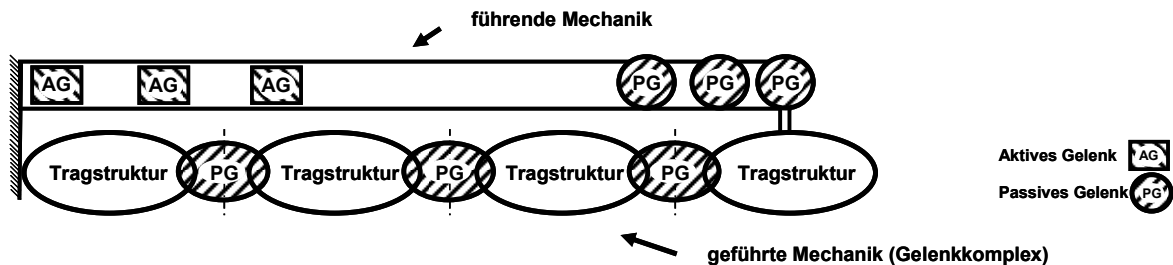


Abbildung 5.3-10: Schema eines führenden Antriebs von drei Freiheitsgraden

Beispiel: Antrieb einer Pan-Tilt-Einheit (Kameraführung um die Schwenk- und Neigechse). Bei diesem Gelenk handelt es sich um ein Kugelgelenk mit drei Freiheitsgraden (Abbildung 5.3-11).

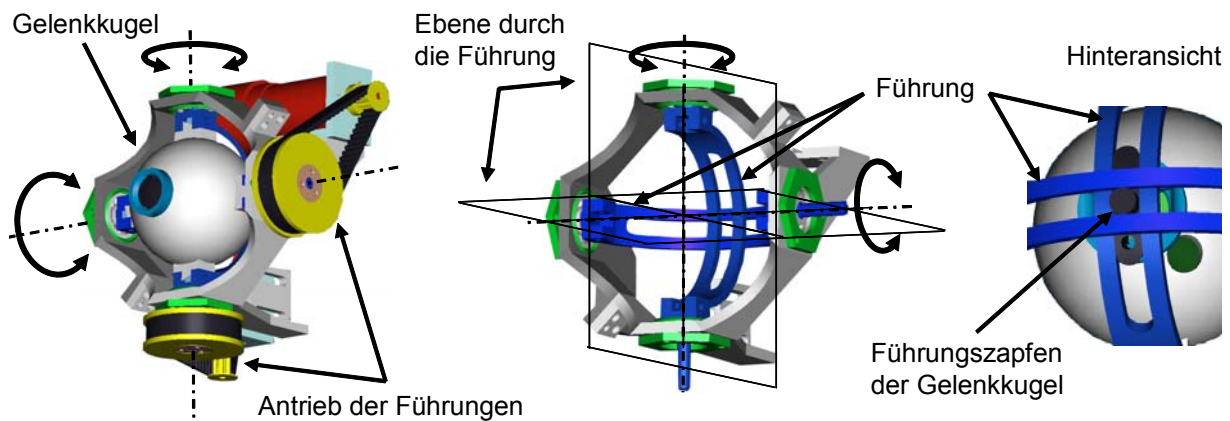


Abbildung 5.3-11: Beispiel für einen führenden Gelenkantrieb (Pan-Tilt-Einheit aus einer Konzeptstudie)

In dem zur Verfügung stehenden Bauraum kann kein Antrieb für ein Kugelgelenk integriert werden. Daher ist dieses von außen führend anzutreiben. Die Schwenk- und die Neigebewegung des Kugelgelenks werden von zwei Führungen angetrieben, die rotativ bewegt werden und den Führungszapfen der Gelenkkugel mitbewegen. Die Roll-Bewegung des Kugelgelenks wird nicht unterstützt. Eine Kopplung der Bewegungen entsteht dadurch, dass die beiden Antriebe nicht exakt die Pan- und die Tilt-Bewegung der Kamera ansteuern, sondern den Führungszapfen der Gelenkkugel auf zwei Ebenen, die sich mit den Führungen mitbewegen, um das Zentrum der Kugel drehen (Abbildung 5.3-11).

Ein Sonderfall eines führenden Gelenkantriebs ist ein Antriebsstrang, der als serielle Kinematik aufgebaut ist und ein oder zwei passive Drehachsen aufweist (Abbildung 5.3-12). Die passiven Gelenke des Antriebsstrangs werden von einer separaten Mechanik führend angetrieben. Der Antriebsstrang überträgt die Antriebsleistung über

die Kontaktstellen der führenden Mechanik hinweg. Die Kinematik des Antriebsstrangs ist die Kinematik der Robotermechanik.

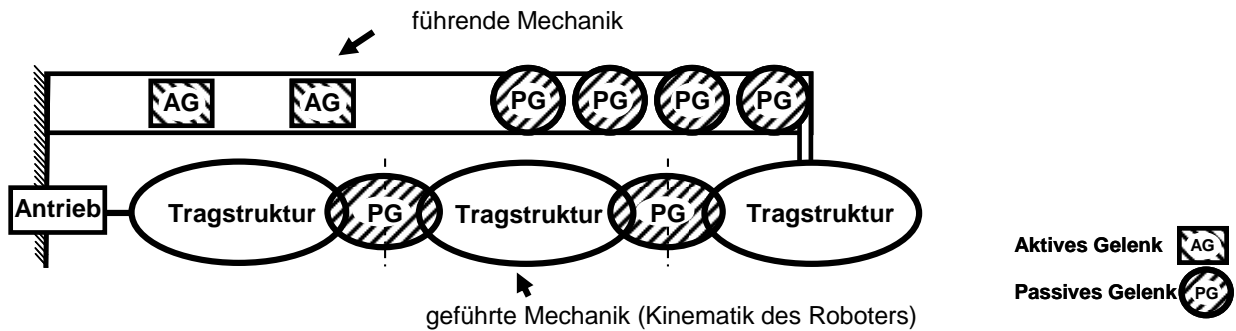


Abbildung 5.3-12. Schema eines führenden Antriebsstrangs mit zwei passiven Gelenken und einer Führung mit vier passiven Gelenken an der Kontaktstelle

Beispiel: Der Antriebsstrang ist ein Systemelement der Tragstruktur in einem Halsgelenk eines humanoiden Roboters und enthält ein Kreuzgelenk mit zwei passiven Freiheitsgraden (Pitch- und Yaw-Drehachse), die von einer Führung angetrieben werden (Abbildung 5.3-13). Die Führung besteht aus zwei linear bewegten Platten, die übereinander angeordnet sind. Die obere Platte führt die Welle, die oberhalb des Kardangelenks angebracht ist. Der Ausgleich zwischen der oberen Platte, die sich auf einer Ebene bewegt, und der Welle, in der sich jeder Punkt auf einem Kugelsegment bewegt, erfolgt über ein Kugelgelenk, das eine passive Pitch-, Yaw- und Roll-Bewegung und zusätzlich eine lineare Verschiebung der Antriebswelle relativ zu der oberen Platte ermöglicht.

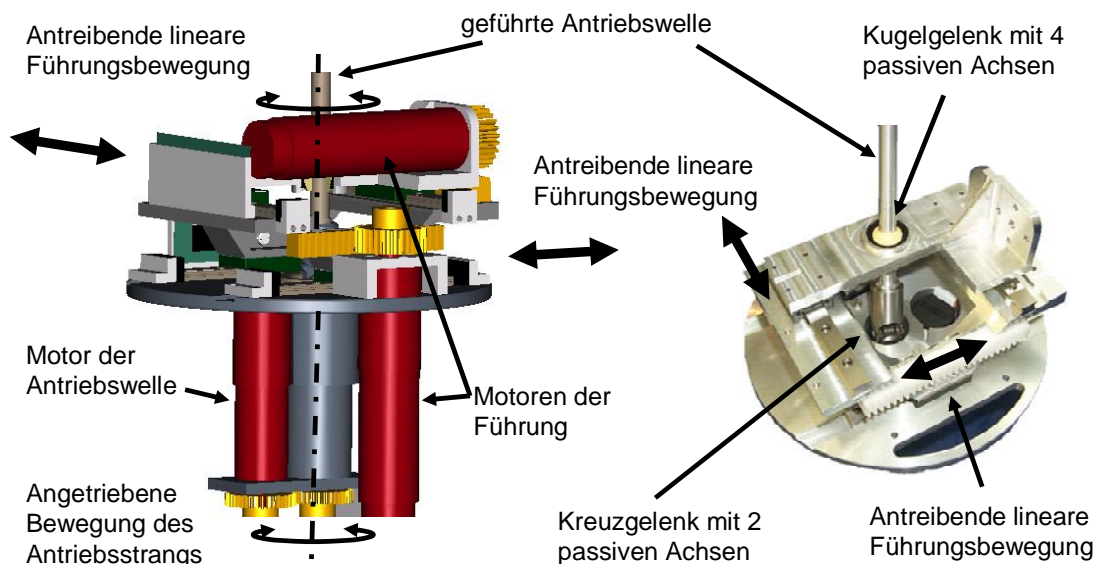


Abbildung 5.3-13: Beispiel für ein geführtes Kreuzgelenk, links CAD Darstellung, rechts Foto ohne Anbauteile (Kapitel 8.2.1, Halsgelenk I)

In Tabelle 5.3-2 sind die Klassen für die Antriebsstränge von führenden Gelenkantrieben dargestellt.

	führender Antrieb			
	geführte Drehachsen		geführte und antrieb. Drehach.	
Anzahl der geführten Drehachsen	2	3	1	2
Anzahl der überbrückten Drehachsen	2 / 3	3	2 passiv 1 aktiv	2 passiv 1 aktiv

Tabelle 5.3-2: Klassen führender Antriebe

5.3.3 Systemelemente des Antriebsstrangs

Der Antriebsstrang besteht aus einem oder mehreren Systemelementen, die in Serie miteinander verbunden sind. In der im Folgenden vorgestellten Einteilung werden explizit nur die Antriebsstränge separater Gelenkantriebe angesprochen (Kapitel 5.3.2), da diese Antriebsstränge ebenfalls für den Antrieb einer führenden Mechanik genutzt werden können. Es wird betrachtet, welche Arten von passiven Gelenken ein Antriebsstrang aufweisen muss, um ein Einzelgelenk oder ein Mehrfachgelenk zu überbrücken. Einen Sonderfall stellen die Systemelemente dar, die eine freie Beweglichkeit ermöglichen und hier als flexible Systemelemente des Antriebsstrangs bezeichnet werden. Unter diesem Begriff werden Systemelemente zusammengefasst, die zwei starre Segmente der Tragstruktur mit einem Gelenk verbinden, das drei passive rotatorische Achsen aufweist, die sich in einem Punkt schneiden und Systemelemente, deren Endpunkte sich in gewissen Grenzen frei im Raum zueinander bewegen können.

5.3.3.1 Überbrückungen von Gelenken

Überbrückungen von Einzelgelenken

Bei den Technischen Gelenken, die vom Antriebsstrang zu überbrücken sind, handelt es sich um fluchtende oder nicht fluchtende Gelenke oder um Kugelgelenke. Diese Gelenke können als Einzelgelenk oder kombiniert in Mehrfachgelenken auftreten (Kapitel 5.2.2).

In Abbildung 5.3-14 ist dargestellt, welche Möglichkeiten bestehen, Einzelgelenke zu überbrücken.

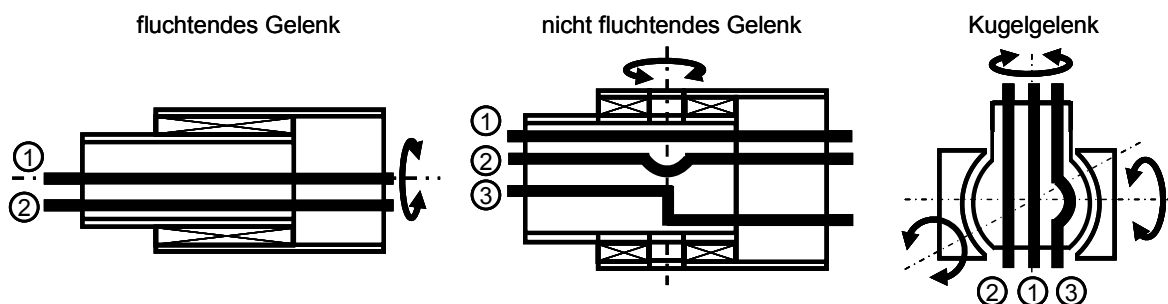


Abbildung 5.3-14: Überbrückung von Einzelgelenken

Dies geschieht unter der Annahme, dass der Antriebsstrang parallel zu der Körperachse der ersten Tragstruktur zu dem Gelenk geführt und parallel zu der Körperachse der zweiten Tragstruktur wieder vom Gelenk weggeführt wird. Dazwischen überquert der Antriebsstrang die Drehachse.

Überbrückung eines fluchtenden Gelenks (Roll-Drehachse)

Fall 1: Der Antriebsstrang ist koaxial zur Drehachse des Gelenkes angeordnet und muss eine passive Roll-Bewegung ermöglichen.

Fall 2: Der Antriebsstrang ist parallel zu Drehachse des fluchtenden Gelenks angeordnet und muss sowohl eine Roll-Bewegung als auch eine räumliche Bewegung und eine Längenänderung passiv ermöglichen, da bei dieser Bewegung der Antriebsstrang quasi um die Drehachse gewickelt wird. D.h. hierfür kommt nur ein flexibles Systemelement des Antriebsstrangs in Frage, das zusätzlich eine Längenänderung ermöglicht.

Überbrückung eines nicht fluchtenden Gelenks (Pitch- oder Yaw-Drehachse)

Fall 1: Der Antriebsstrang schneidet die Drehachse des nicht fluchtenden Gelenks und muss daher an dieser Stelle ein passives nicht fluchtendes Gelenk aufweisen.

Fall 2: Der Antriebsstrang überquert mit Versatz die Drehachse des nicht fluchtenden Gelenks. Hierfür muss der Antriebsstrang über eine passive Beweglichkeit entlang einer Pitch-Drehachse verfügen und eine Längenänderung ermöglichen.

Fall 3: Der Antriebsstrang wird um 90° umgeleitet und verläuft dann zu der Pitch-Drehachse des Gelenks koaxial oder parallel. Danach wird er wieder um 90° umgeleitet und zu dem Endstück des Gelenks geführt. Diese Drehachse kann an der Stelle, die entlang der Drehachse verläuft, wie eine Roll-Drehachse oder an den Stellen der rechtwinkligen Umleitung mit einem passiven Revolvergelenk überbrückt werden.

Überbrückung eines Kugelgelenks (Roll-, Pitch- und Yaw-Drehachse)

Fall 1: Der Antriebsstrang verläuft durch den Punkt, in dem sich die drei Drehachsen des Gelenks schneiden. Der Antriebsstrang benötigt in diesem Punkt passive Gelenke um alle Raumachsen, was nur mit einem frei beweglichen, d.h. flexiblen Antriebsstrang möglich ist.

Fall 2: Der Antriebsstrang schneidet eine Pitch-Drehachse und hat zu der anderen Versatz. Zusätzlich zu der gleichen passiven Beweglichkeit wie in Fall 1, muss der Antriebsstrang eine passive lineare Bewegung ermöglichen. Der Antriebsstrang muss frei beweglich sein, d.h. er ist flexibel und ermöglicht eine ausreichende Längenänderung.

Fall 3: Der Antriebsstrang hat zu beiden Drehachsen Versatz. Der Antriebsstrang muss frei beweglich sein und eine ausreichende Längenänderung ermöglichen.

Eine Überbrückung der Drehachsen mit einer zu den Drehachsen koaxialen Ausrichtung des Antriebsstrangs entspricht den Fällen 4, 5, 6 der nachfolgend beschriebenen Überbrückung einer Pitch- und einer Yaw-Drehachse, dem ein passives fluchtendes Gelenk nachgeschaltet ist.

Überbrückungen von Mehrfachgelenken

Es ist zwischen der Anzahl und der Art der zu überbrückenden Drehachsen zu unterscheiden, die sich in einem Mehrfachgelenk senkrecht in einem Punkt schneiden.

Zwei zu überbrückende Drehachsen: Pitch-Yaw

Dieses Gelenk entspricht einem Kardangelenken.

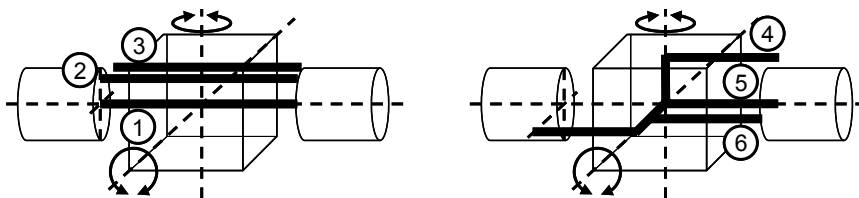


Abbildung 5.3-15: Überbrückung eines Mehrfachgelenks, das aus zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken besteht

Fall 1: Die Antriebswelle schneidet beide Drehachsen. An dieser Stelle muss die Antriebswelle eine passive Pitch- und eine passive Yaw-Drehachse aufweisen.

Fall 2: Das Systemelement schneidet eine Drehachse und weist Versatz zur anderen auf. Der Antriebsstrang muss über zwei passive Gelenke (Pitch und Yaw) verfügen und einen Längenausgleich ermöglichen.

Fall 3: Das Systemelement weist Versatz zu beiden Drehachsen auf. Der Antriebsstrang muss über zwei passive Gelenke (Pitch und Yaw) verfügen und einen Längenausgleich ermöglichen.

Fall 4: Der Antriebsstrang wird so umgeleitet, dass er entlang beider Drehachsen ein Stück koaxial verläuft. Diese können auf die gleiche Weise überbrückt werden wie ein fluchtendes Gelenk oder an den Umlenkstellen mithilfe eines Revolvergelenks.

Fall 5: Der Antriebsstrang wird so umgeleitet, dass er entlang einer Drehachse ein Stück verläuft und die andere schneidet. Die erste kann auf die gleiche Weise überbrückt werden wie ein fluchtendes Gelenk oder mithilfe eines Revolvergelenks und die andere mit einem passiven nicht fluchtenden Gelenk.

Fall 6: Der Antriebsstrang wird so geleitet, dass er entlang einer Drehachse ein Stück verläuft und die andere mit Versatz passiert. Die eine Drehachse kann wie ein fluchtendes Gelenk überbrückt werden oder mit einem passiven Revolvergelenk, und

die andere Drehachse kann mit einem passiven nicht fluchtenden Gelenk und einem Längenausgleich überbrückt werden.

Zwei zu überbrückende Drehachsen: Roll-Pitch

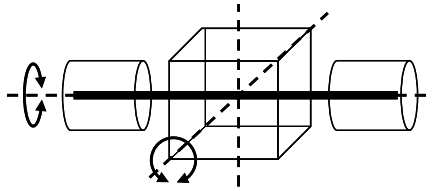


Abbildung 5.3-16: Überbrückung eines Mehrfachgelenks, das aus einem fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk besteht

Da die Roll-Drehachse koaxial zur den Körperachsen der beiden Tragstrukturen verläuft, zwischen denen sich die Lagerung des Rollgelenks befindet, kann der Ort, an dem die Drehachse überbrückt wird, entlang der Körperachsen verschoben werden. Daher entspricht dies der Überbrückung einer Serienschaltung aus einem fluchtenden und einem nicht fluchtenden Einzelgelenk.

Drei zu überbrückende Drehachsen: Roll-Pitch-Yaw

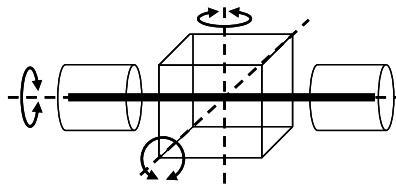


Abbildung 5.3-17: Überbrückung eines Mehrfachgelenks, das aus einem fluchtenden und zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken besteht

Eine Überbrückung dieses Mehrfachgelenks entspricht der Überbrückung eines Kugelgelenks (s.o.).

Drei zu überbrückende Drehachsen: Roll-Pitch-Roll

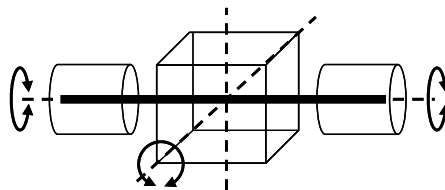


Abbildung 5.3-18: Überbrückung eines Mehrfachgelenks, das aus einem fluchtenden, einem nicht fluchtenden und einem weiteren fluchtenden Einzelgelenk besteht

Da die Roll-Drehachse koaxial zur den Körperachsen der beiden Tragstrukturen verläuft, zwischen denen sich die Lagerung des Rollgelenks befindet, kann der Ort, an dem die Drehachse überbrückt wird, entlang der Körperachsen verschoben werden. Daher entspricht dies der Überbrückung einer Serienschaltung aus einem fluchtenden, einem nicht fluchtenden und einem weiteren fluchtenden Einzelgelenk.

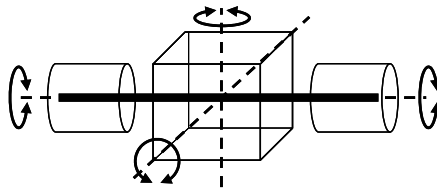
Vier zu überbrückende Drehachsen: Roll-Pitch-Yaw-Roll

Abbildung 5.3-19: Überbrückung eines Mehrfachgelenks, das aus einem fluchtenden, zwei nicht fluchtenden und einem weiteren fluchtenden Einzelgelenk besteht

Dies entspricht der Überbrückung eines Kugelgelenks (s.o.) und der Überbrückung eines weiteren nachgeschalteten fluchtenden Gelenks.

In Tabelle 5.3-3 sind die passiven Freiheitsgrade von Systemelementen zusammengefasst, die für das Überbrücken von Einzel- und Mehrfachgelenken benötigt werden.

Überbrücken eines Einzelgelenks – Fluchtendes Gelenk (Roll-Drehachse)	
Lage des Antriebsstrangs zu der zu überbrückenden Drehachse	Arten des passiven Freiheitsgrads
Koaxial zur Drehachse	Roll koaxial zur Drehachse
Parallel zur Drehachse	flexibel + Längenausgleich
Überbrücken eines Einzelgelenks – Nicht fluchtendes Gelenk (Pitch-Drehachse)	
Lage des Antriebsstrangs zu der zu überbrückenden Drehachse	Arten des passiven Freiheitsgrads
schneiden sie senkrecht	Pitch durch Drehachse
senkrecht mit Versatz	Pitch + Längenausgleich
Umlenkung auf Drehachse	wie Einzelgelenk mit Roll-Drehachse; Revolvergelenk an der Umlenkung
Überbrücken eines Einzelgelenks – Kugelgelenk (Pitch-Yaw-Roll-Drehachse)	
Lage des Antriebsstrangs zu den zu überbrückenden Drehachsen	Arten des passiven Freiheitsgrads
durch den Schnittpunkt der Drehachsen	flexibel
Versatz zu einer oder zwei Drehachsen	Pitch Yaw Roll + Längenausgleich
Versatz zu drei Drehachsen	flexibel + Längenausgleich
Umlenkung auf Drehachsen	jeweils wie Einzelgelenk mit Roll-Drehachse oder mit Revolvergelenk an der Umlenkung
Überbrücken eines Mehrfachgelenks – Pitch-Yaw-Drehachsen	
Lage des Antriebsstrangs zu den zu überbrückenden Drehachsen	Arten des passiven Freiheitsgrads
schneidet beide	Pitch und Yaw
schneidet eine, Versatz zur anderen	Pitch und Yaw + Längenausgleich
Versatz zu beiden	Pitch und Yaw + Längenausgleich
Umleitung auf beide Drehachsen	zweimalige Überbrückung einer Roll-Drehachse
Umleitung auf eine Drehachse, schneidet die andere	Überbrückung einer Roll- und einer Pitch-Drehachse
Umleitung auf eine Drehachse, parallel mit Versatz zur anderen	wie Überbrückung Roll-Drehachse und Pitch-Drehachse mit Versatz
Überbrücken eines Mehrfachgelenks – Pitch-Roll-Drehachsen	
Hintereinanderschaltung eines zu überbrückenden fluchtenden und eines nicht fluchtenden Einzelgelenks	
Überbrücken eines Mehrfachgelenks – Roll-Pitch-Yaw-Drehachsen	
wie Überbrückung eines Kugelgelenks	
Überbrücken eines Mehrfachgelenks – Roll-Pitch-Roll-Drehachsen	
Hintereinanderschaltung eines zu überbrückenden fluchtenden + nicht fluchtendes + fluchtenden Einzelgelenks	
Überbrücken eines Mehrfachgelenks – Roll-Pitch-Yaw-Roll-Drehachsen	
wie Überbrückung eines Kugelgelenks + fluchtendes Einzelgelenk	

Tabelle 5.3-3: Notwendige passive Freiheitsgrade in Systemelementen des Antriebsstrangs, um Mehrfachgelenke zu überbrücken

5.3.3.2 Schnittstellen und Eigenschaften der Systemelemente im Antriebsstrang

Damit zwei Systemelemente des Antriebsstrangs miteinander kombiniert werden können, müssen sie über zueinander kompatible Wirkflächen verfügen. Neben der physikalischen Struktur der Wirkflächen der Schnittstellen ist die Art der zu übertragenden Antriebsleistung ausschlaggebend. Hierbei sind die Fälle zu unterscheiden, ob die Leistung durch eine rotatorische oder durch eine translatorische Bewegung eines

Bauteils übertragen wird oder durch einen Volumenstrom eines Fluids. In Tabelle 5.3-4 sind Beispiele für Systemelemente des Antriebsstrangs aufgeführt, die mit ihrer Funktion die Antriebsleistung vom Eingang zum Ausgang wandeln.

Eingang Ausgang	rot. Bew.	transl. Bew.	Druck, Weg
rot. Bew.	Harmonic-Drive-Getriebe	Seilzug mit Umlenkrolle	Axialkolbenpumpen
transl. Bew.	Kugelumlaufspindel	Seilzug	hydraulischer Zylinder
Druck, Weg	Axialkolbenpumpen	hydraulischer Zylinder	hydraulischer Druckwandler

Tabelle 5.3-4: Wandlerfunktion der Systemelemente im Antriebsstrang bezüglich der Art der übertragenen Leistung mit Beispielen

Eine weitere für den Einbau wichtige Kenngröße ist die geometrische Lage des Eingangs des Systemelements zu dessen Ausgang. Sechs prinzipielle Möglichkeiten sind in Tabelle 5.3-5 dargestellt. Passive Drehachsen, die eventuell in den Komponenten enthalten sind, befinden sich in dieser Darstellung in der Nullposition.

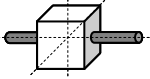
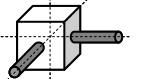
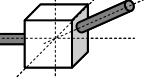
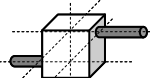
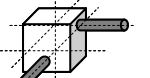
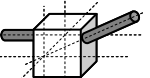
Lage Eingang zu Ausgang	parallel	rechtwinklig	schiefwinklig
ohne Versatz			
mit Versatz			

Tabelle 5.3-5: Geometrische Lage vom Eingang zum Ausgang des Systemelements im Antriebsstrang; passive Gelenke befinden sich hierbei in der Nullstellung

Es existiert eine Vielzahl von Systemelementen des Antriebsstrangs, die, um auf sie in der Entwicklung gut zugreifen zu können, in einer Klassifikation einzuordnen sind. Neben den oben dargestellten Eigenschaften der passiven Gelenke und der Schnittstellen dieser Systemelemente sind weitere Funktionen und Eigenschaften in der Klassifikation mit zu berücksichtigen. Diese Eigenschaften werden im Folgenden beschrieben.

- Spiel im Systemelement, bei wechselndem Antriebsmoment. Dies ist in den meisten Gelenken eines humanoiden Roboters nicht zu tolerieren.
- Am anzutreibenden Gelenk muss eine bestimmte Leistung in Form einer Drehzahl und eines Moments vorliegen. Die vom Aktor abgegebene Antriebsleistung muss so gewandelt werden, dass am Gelenk das gewünschte Moment bei der gewünschten Drehzahl anliegt. Bei einer Übertragung von Drehbewegungen wird von einem Übersetzungsverhältnis gesprochen, das hier als generalisiertes Übersetzungsverhältnis bezeichnet wird, in Abhängigkeit davon, ob das übertragene Moment oder

- die Kraft kleiner oder größer wird. Diese Generalisierung ist notwendig, um fluidischen Systemelementen ebenfalls eine Übersetzung zuordnen zu können.
- Für das dynamische Verhalten eines Systemelements im Antriebsstrang sind dessen Elastizität und Dämpfung bestimmend und die Parameter, von denen diese beeinflusst werden.
 - Die Reibung im Antriebsstrang macht eine Aussage über die Reibung im Gelenk, den dadurch bedingten Verlusten und dem Verhalten des Gelenks, wenn dieses von außen angetrieben wird. D.h. wie stark ist der Antriebsstrang gedämpft. Von welchen Kenngrößen ist die Reibung abhängig?
 - Ist der Antriebsstrang selbsthaltend und tritt in manchen Situationen der Stick-Slip-Effekt auf, was unbedingt zu vermeiden ist.
 - Eine wichtige Eigenschaft für die Integration der Systemelemente im Antriebsstrang ist, ob daran eine interne oder externe (Kapitel 5.4.2) Kraft-, bzw. Momentenmessung angebracht werden kann und ob diese, wenn in dem Systemelement eine Übersetzung vorhanden ist, an einer stärker oder schwächer belasteten Stelle durchgeführt wird.
 - Informationen über das Gewicht, den Bauraum und die Leistungsdichte.
 - Über welche Arten von passiven Gelenken verfügt der Antriebsstrang und welche maximalen Winkelbewegungen erlauben diese? Was sind die beschränkenden Faktoren für die passiven Freiheitsgrade?
 - Besteht eine Abhängigkeit der übertragenen Leistung zu den passiven Freiheitsgraden?

Eine Klassifikation von Systemelementen des Antriebsstrangs ist im Anhang in Kapitel 11.1 dargestellt. Diese Klassifikation ist nach der Art der zu überbrückenden Drehgelenken gegliedert.

5.4 Klassifikation der Sensorik

Der Ist-Zustand von physikalischen Größen der Mechanik des Robotersystems wird mit Sensoren gemessen und dem Regelungssystem für einen Abgleich mit dem Sollzustand zur Verfügung gestellt. Für eine Vereinfachung der Integration der Sensoren im mechanischen System ist es zielführend, diese anhand ihrer geometrischen Anforderungen an die Umgebung zu klassifizieren und dies mit den Funktionen und den Eigenschaften der Sensoren, die für die Integration im mechatronischen Gesamtsystem entscheidend sind, zu verknüpfen.

Beispielhaft werden im Folgenden Klassierungen für Winkel- und Kraftsensoren vorgestellt, die in das System der hier vorgestellten Roboter zu integrieren sind. Betrachtet werden hierbei die geometrischen Eigenschaften der Orte, an denen die Sensoren angebracht werden.

5.4.1 Winkel- und Abstandssensoren

Am exaktesten kann der Gelenkwinkel über eine Lagebestimmung der im Drehpunkt zueinander beweglichen Bauteile gemessen werden. Wenn hierfür kein ausreichender Bauraum zu Verfügung steht, kann der Winkel auch indirekt mithilfe von anderen geometrischen Daten bestimmt werden, die einen Rückschluss auf den Gelenkwinkel ermöglichen. Hierfür eignen sich z.B. Lageinformationen des Antriebsstrangs. Ausschlaggebend für die Integration von Sensoren am Gelenk ist die geometrische Ausrichtung der Wirkflächenpaare zueinander, deren Lage bzw. deren Lageänderung zu bestimmen ist. Dies bildet die Grundlage der hier vorgestellten Klassifikation

Die Leitstützstruktur eines Sensors, der einen Winkel, eine Länge oder deren Änderung bestimmt, besteht aus drei Teilen. Hierbei handelt es sich um das Sensorhauptteil, das Sensornebenteil und dazwischen das Verbindungsteil (Abbildung 5.4-1), die wiederum über Wirkflächenpaare miteinander verbunden sind.

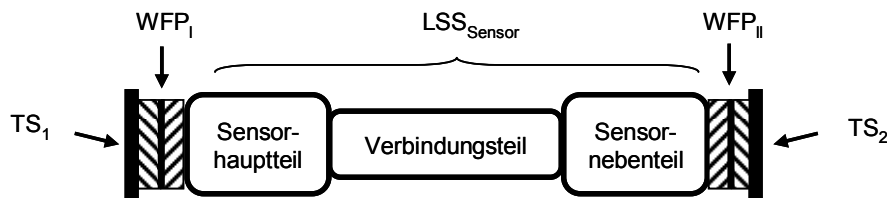


Abbildung 5.4-1: Anteile eines Sensors zur Winkel- oder Abstandsmessung

Sensorhaupt- und Nebenteil sind jeweils über eine Wirkfläche in Kontakt mit einer der beiden Wirkflächen, deren Lageänderung zu bestimmen ist. Im Sensorhauptteil wird die Information über die Lageänderung, die über das Verbindungsteil übertragen wird, in ein elektrisches Signal umgewandelt, um es an das Regelungssystem weiterzuleiten. Das Verbindungsteil stellt eine Leitstützstruktur dar, die Informationen transportiert. Hierbei handelt es sich um eine formschlüssige, stoffschlüssige oder feldschlüssige Verbindung zwischen dem Sensorhaupt- und Sensornebenteil⁸².

Eine Klassifikation der Sensoren erfolgt anhand der geometrischen Eigenschaften, welche die Wirkflächen der beiden Tragstrukturen aufweisen müssen, damit das Sensorhaupt- und das Sensornebenteil angebracht werden kann.

Bei den Tragstrukturen kann es sich um Vollkörper oder um dünne Bleche handeln. Das Sensorteil kann an oder in dem Vollkörper und an oder hinter dem Blech angebracht werden. Die beiden Fälle: an dem Vollkörper und vor dem Blech sind identisch. Daher werden hier nur drei verschiedene Anbringungsvarianten betrachtet (davor, intern, dahinter, Tabelle 5.4-1).

⁸² Matthiesen 2002

Tragstruktur Einbauort	Vollkörper	dünner Körper
davor		
intern		
dahinter		

Index
 Sensorhaupt- oder
 Sensornebenteil:

Körper der
 Tragstruktur:

Tabelle 5.4-1: Einbauorte des Sensorhaupt- und -nebenteils

5.4.1.1 Geometrische Lage der Wirkflächen bei einer Winkelmessung

Die Drehung von zwei allgemeinen Körpern relativ zueinander – um eine konstante Drehachse – ist in Abbildung 5.4-2 dargestellt.

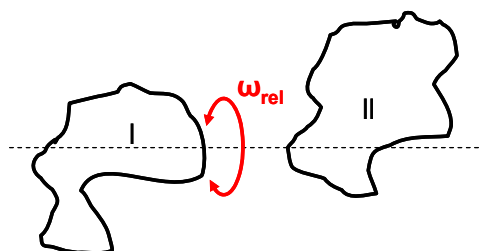


Abbildung 5.4-2: Allgemeine Körper, die sich um eine konstante Achse zueinander drehen

Die Wirkflächen der beiden Körper, die für die Anbringung des Sensors genutzt werden, können auf beliebige Weise einander zugeordnet sein. Vereinfachend wird angenommen, dass es sich bei diesen Oberflächen um Wirkflächen handelt, die parallel oder im rechten Winkel zur Drehachse angeordnet sind. Diese Vereinfachung ist zulässig, da eine Oberfläche, die eine andere Form aufweist, konstruktiv umgewandelt werden kann, ohne dass dies entscheidende Auswirkungen auf die Funktion der Mechanik hat. Es sind drei Hauptfälle zu unterscheiden (Tabelle 5.4-2): Beide Wirkflächen sind senkrecht, parallel oder die eine senkrecht und die andere parallel zur Drehachse ausgerichtet. Des Weiteren ist zu unterscheiden, wie die beiden Wirkflächen einander zugeordnet sind und ob der Sensor einen zentralen Freiraum entlang der Drehachse aufweist. Dieser Freiraum kann z.B. dafür genutzt werden, ein elektrisches Kabel entlang der Drehachse durch ein Gelenk zu leiten. Ein möglicher Versatz der Oberflächen zueinander wird in den Fällen, die sich hieraus ergeben, in Tabelle 5.4-2 nicht betrachtet, da dies konstruktiv einfach auszugleichen und individuell auf den jeweils einzubauenden Sensor abzustimmen ist.

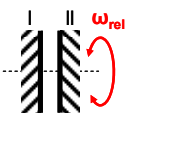
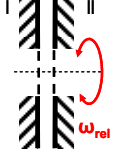
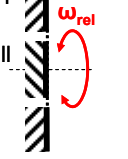
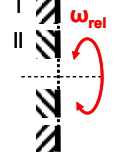
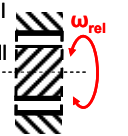
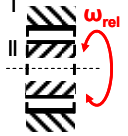
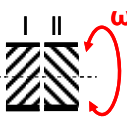
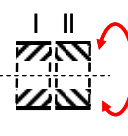
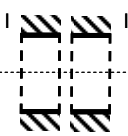
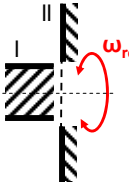
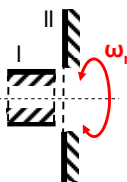
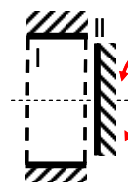

		Lage der Wirkflächen zueinander				
		gegengerichtet		gleichgerichtet		
Lage der Wirkflächen zur Drehachse	beide senkrecht zur Drehachse	ohne Durchgang	mit Durchgang	ohne Durchgang	mit Durchgang	
						
	beide parallel zur Drehachse	gegengerichtet		außerhalb gleichgerichtet		innerhalb gleichgerichtet
		ohne Durchg.	mit Durchg.	ohne Durchg.	mit Durchg.	ohne/mit Durchgang
						
	eine senkrecht, die andere parallel zur Drehachse	senkrecht außerhalb		senkrecht innerhalb		
ohne Durchgang		mit Durchgang	ohne Durchgang	mit Durchgang		
						

Tabelle 5.4-2: Klassifikation der Lage der Wirkflächen von Winkelsensoren bei rotatorischen Bewegungen

An jeder Wirkfläche der Tragstruktur kann das Sensorhaupt bzw. -nebeneil mit dessen Wirkfläche davor, intern oder dahinter angebracht werden, was in Tabelle 5.4-1 dargestellt ist.

5.4.1.2 Geometrische Lage der Wirkflächen bei einer Abstandsmessung

Bewegung zweier allgemeiner Körper linear zueinander (Abbildung 5.4-3). Entscheidend für die Anbringung von Sensoren ist die relative Lage der jeweiligen Körperoberflächen zu der Bewegungsachse. Vereinfachend wird auch bei der Linearbewegung angenommen, dass die Wirkflächen der Tragstrukturen parallel oder senkrecht zur Bewegungsrichtung angeordnet sind. Hieraus ergeben sich fünf Fälle, je nachdem, ob die Wirkflächen ihren Abstand ändern oder parallel zueinander verschoben werden (Tabelle 5.4-3).

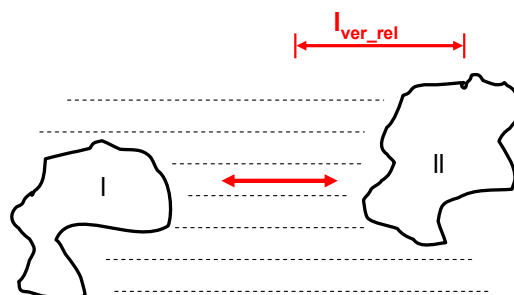


Abbildung 5.4-3: Allgemeine Körper, die sich linear zueinander bewegen

An jeder Wirkfläche der Tragstruktur kann das Sensorhaupt bzw. -nebenteil mit dessen Wirkfläche davor, intern oder dahinter angebracht werden, was in Tabelle 5.4-1 dargestellt ist.

		Lage der Wirkflächen zueinander		
		gegengerichtet	gleichgerichtet	senkrecht
Bewegungsrichtung	Abstandsänderung			
	Parallel zueinander			

Tabelle 5.4-3: Klassifikation der Lage der Wirkflächen von Abstandssensoren bei linearen Bewegungen

5.4.1.3 Schnittstellen und Eigenschaften der Systemelemente zur Winkel- bzw. Längenmessung

Die Funktion des Sensors besteht darin, aus der physikalischen Lage der Wirkflächenpaare ein elektrisches Signal zu generieren, in dem die Lageinformationen enthalten sind.

Die Informationen über die Sensoren, die in einer Klassifikation abzulegen sind, setzen sich aus Informationen über die Schnittstellen und Funktionen der Sensoren zusammen und über deren spezifischen Eigenschaften.

Bei den Eigenschaften der Sensoren handelt es sich um:

- Auflösung, Linearität, Taktung, Wiederholgenauigkeit des Sensors.
- Störgrößen, z.B. Schwingungen die unter bestimmten Randbedingungen als Fehler in die Messung mit eingehen.
- führt der Sensor eine absolute oder eine relative Messung durch?
- welche Randbedingungen fordert der Sensor von seiner Umgebung?

5.4.2 Sensoren zur Bestimmung des Antriebsmoments

Der Antrieb ist eine Funktionseinheit, die einen Energiefluss, der an der Eingangsschnittstelle anliegt, an das Gelenk als ein Moment bei einer bestimmten Drehzahl abgibt. Für eine Kraftregelung der Gelenke ist es notwendig, das Moment zu bestimmen, mit dem die Gelenke angetrieben werden. Zu unterscheiden ist zwischen einer antriebsseitigen und einer abtriebsseitigen Messung des Moments. Die eine bestimmt das Moment, das vom Antrieb auf das Gelenk übertragen wird und die andere das Moment, das von der im Gelenk bewegten Tragstruktur weitergeleitet wird.

Im Folgenden werden Sensoren beschrieben, die eine antriebsseitige Bestimmung des Momentes durchführen und daher in die Aktorik zu integrieren sind.

Für eine Messung des Antriebsmoments besteht die Möglichkeit, die von der Energiequelle bezogene Leistung zu bestimmen und mithilfe einer Messung der Motordrehzahl und anhand der spezifischen Drehzahl-Drehmomentenkennlinie des Aktors auf das abgegebene Moment zu schließen. Bei dieser Messung gehen alle Verluste im Antrieb als Fehler mit ein. Diese Verluste können in manchen Systemelementen des Antriebsstrangs sehr groß werden und stark nichtlineare Abhängigkeiten aufweisen, sodass sie mit vertretbarem Aufwand nicht zu korrigieren sind. Daher wird eine Leistungsmessung an der Energiezufuhr für die Aktoren von humanoiden Robotern nur als Schutz gegen eine Überlastung eingesetzt. Der Antrieb besteht aus einem Aktor, der über in Serie geschaltete Wandler mit dem Gelenk verbunden ist (Abbildung 5.3-2). Das antreibende Moment ist daher an einem Systemelement des Antriebsstrangs zu bestimmen, an dem das Gelenkmoment ohne nennenswerte Störeinflüsse anliegt. In der Regel handelt es sich um das Systemelement, das direkt mit der angetriebenen Tragstruktur verbunden ist.

5.4.2.1 Interne und externe Messungen

Eine Messung des von einem Systemelement des Antriebsstrangs übertragenen Moments kann intern im Systemelement oder extern an einer eventuell vorhandenen Verbindung zur Tragstruktur durchgeführt werden (Abbildung 5.4-4).

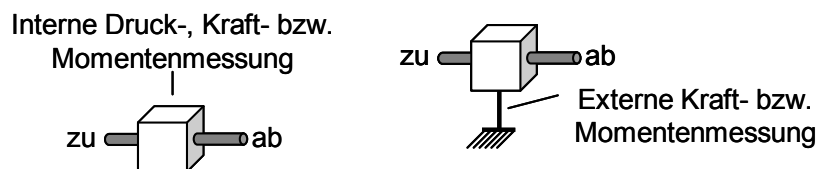


Abbildung 5.4-4: Interne und externe Messung des übertragenen Antriebsmoments an einem Systemelement des Antriebsstrangs

Bei einer internen Messung werden physikalische Größen am Systemelement und bei einer externen Messung physikalische Größen an einer Verbindung zur Tragstruktur bestimmt. Die gemessenen Größen weisen eine Abhängigkeit zum übertragenen Moment im Antriebsstrang auf. Ein Beispiel hierfür ist eine Verformung des Antriebsstrangs oder dessen Aufhängung aufgrund eines Torsionsmoments oder einer Kraft.

Allgemein ist zwischen direkten und indirekten Messungen zu unterscheiden. Der Sensor einer direkten Messung nimmt selbst mit seinem Aufnehmer an der Kraftübertragung teil und bestimmt die Spannung in diesem, wie dies z.B. bei Messungen mit Piezokristallen der Fall ist. Bei indirekten Messungen misst der Sensor Größen am Systemelement, die sich durch das Moment ändern. Dies ist z.B. bei Messungen mit Dehnmessstreifen der Fall, die eine Änderung des elektrischen Widerstands aufgrund einer Längenänderung erfahren.

5.4.2.2 Messprinzipien

Die Messverfahren für die Bestimmung des Antriebsmoments an Systemelementen des Antriebsstrangs, die mechanische Energie übertragen, lassen sich anhand des Aufbaus des Systemelements und anhand der Kraft- bzw. Momentenwirkung unterteilen (Tabelle 5.4-4).

Messung an drehmoment- bzw. kraftübertragenden Bauteilen	Dehnungsmessung auf der Oberfläche des Verformungskörpers	
	Torsions- bzw. Kraftmessung	Messung der Verformung des Bauteils
		mechanische Verstärkung der Verformung des Bauteils

Tabelle 5.4-4: Messverfahren von mechanischen Größen (nach Acker⁸³)

Anhand der Verformung, geometrischen Daten des Körpers und dessen Werkstoffkennwerten, kann auf die anliegende Kraft bzw. das Moment geschlossen werden.

Dehnungsmessung auf der Oberfläche des Verformungskörpers

Es existieren verschiedene Methoden, um Verformungen am Bauteil zu detektieren⁸³. Das hierbei meistgenutzte Verfahren ist das Applizieren von Dehnmessstreifen, in denen ein längs der Dehnrichtung aufgebrachter Leiter eine Änderung des elektrischen Widerstands aufgrund der Längenänderung erfährt. Dieses Verfahren ist zuverlässig und bietet eine hohe Genauigkeit. Ein weiteres Verfahren ist das Aufbringen einer magnetoelastischen Folie, deren Permeabilität abhängig ist von der mechanischen Spannung, oder das Aufbringen einer Folie, deren Kapazität sich durch eine Verformung ändert. Die beiden letzten Verfahren befinden sich noch im Versuchsstadium bzw. sind sehr kostspielig in ihrer Anwendung. Aus diesem Grund erfolgen hier Dehnungsmessungen an der Oberfläche von Bauteilen ausschließlich mit Dehnmessstreifen.

Messung der Verformung des Bauteils

In diesem Verfahren wird eine Formänderung des Bauteiles gemessen. Hierfür werden verschiedene optische, magnetische und kapazitive Methoden eingesetzt.

Bei diesen Messungen sind zwei verschiedene Prinzipien zu unterscheiden. Bei dem einen wird die Längenänderung bzw. der Torsionswinkel direkt am Verformungskörper gemessen. Bei dem anderen wird die Änderung des Abstandes bzw. des Verdrehwin-

⁸³ Acker 2001 - S.18 , S.24-25

kels des Anfangspunktes und des Endpunktes des Verformungskörpers zu einem zur Bewegung ortsfesten Nullpunkt bestimmt. Aus der Differenz von beiden ergibt sich die gesuchte Längenänderung bzw. der gesuchte Torsionswinkel. Für eine Messung der Lage beider Endpunkte eines Verformungskörpers zu einem Nullpunkt werden zwei Aufnehmer benötigt.

Mechanische Verstärkung der Verformung am Bauteil

Durch eine spezielle Formgebung des Messkörpers erfahren einzelne Körpersegmente eine stärkere Verformung als die umliegenden. Diese Verformungen können dann z.B. mit Dehnmessstreifen oder mit anderen Verfahren, die Verformungen erfassen, detektiert werden.

Insgesamt ergibt sich hieraus eine Klassierung der Messprinzipien für Zug-/Druck- bzw. Torsionsmessungen, die in Tabelle 5.4-5 dargestellt ist.

		Messung am Verformungskörper			Messung zu einem Nullpunkt, einfache Körper	Spannungsmessung, zwischen zwei Körpern
		an der Oberfläche, einfache Körper	am Körper, einfache Körper	Verstärkung, komplexe Körper		
Belastung	Zug/ Druck	DMS	optische, magnetische, kapazitive Verfahren	DMS, optische, magnetische, kapazitive Verfahren	zwei optische, magnetische, kapazitive Abstandsmessungen	Piezokristall
	Torsion	DMS	optische, magnetische, kapazitive Verfahren	DMS, optische, magnetische, kapazitive Verfahren	zwei Drehwinkel-sensoren	Piezokristall

Tabelle 5.4-5: Klassierung der hier zur Auswahl stehenden Messprinzipien für die Bestimmung des Antriebsmoments an mechanisch belasteten Systemelementen des Antriebsstrangs

5.4.2.3 Schnittstellen und Eigenschaften der Systemelemente zur Bestimmung des Antriebsmoments

Über die Schnittstellen eines Sensors werden diesem die Informationen über den Zustand einer physikalischen Größe zugeführt und die notwendige Energie zur Verfügung gestellt, um ein elektrisches Signal mit Informationen über diese Größe weiterzugeben. Entscheidend für den Einbau eines Sensors in einer Struktur sind die Schnittstellen des Aufnehmers zur Tragstruktur seiner Umgebung.

Bei den Eigenschaften der Sensoren, die in einer Klassierung zu hinterlegen sind, handelt es sich um die gleichen wie für die Sensoren zur Längen- bzw. Abstandsmessung in Kapitel 5.4.1.3.

5.5 Zusammenfassung

Für die in dieser Arbeit durchgeführte Konzeption und den Entwurf humanoider Roboter ist es notwendig, für die zu integrierenden Systemelemente die zur Verfügung stehenden technischen Lösungen in Klassifikationen einzuteilen, in denen Informationen über die Kombinierbarkeit der Systemelemente enthalten sind. In diesem Kapitel werden beispielhaft die Systemelemente der Technischen Gelenke, des Antriebsstrangs und der Winkel- bzw. Kraftsensorik klassifiziert. Es wird herausgearbeitet, wie Einzelgelenke zu Gelenkkomplexen unterschiedlicher Ordnung kombiniert werden können und welche Lösungen sich hiervon für den Einsatz in einem humanoiden Roboter eignen. Weiterhin werden die prinzipiellen Möglichkeiten dargestellt, die für den Antrieb der Gelenke bestehen. Die im Antriebsstrang enthaltenen Systemelemente werden anhand von Eigenschaften, wie z.B. der passiven Überbrückung von Drehachsen, eingeteilt, um sie zu einem Antriebsstrang mit den gewünschten Eigenschaften kombinieren zu können. Winkel- und Kraftsensoren werden nach den Eigenschaften klassifiziert, welche die Umgebung aufweisen muss, um diese daran anbringen zu können. Mithilfe dieser Betrachtungen ist es möglich, in der Konzeption passende Systemelemente auf ihre Verträglichkeit hin zu überprüfen und im Entwurf auszuwählen.

6 Konkretisierung des Zielsystems

Ziel dieses Kapitels ist es, die allgemeinen Anforderungen an den humanoiden Roboter, der im Sonderforschungsbereich 588 „Humanoider Roboter – lernende und kooperierende multimodale Roboter“ der Universität Karlsruhe (TH) entwickelt wird, in ein Anforderungsmodell für den Arm des Roboters umzuwandeln, in dem quantitative Aussagen über das Zielsystem enthalten sind⁸⁴. Dies ermöglicht die Bewertung der unterschiedlichen Lösungsvarianten, die sich aus den Kombinationen von Teilsystemen ergeben⁸⁵.

6.1 Zielsystem für das System des humanoiden Roboters

Der hier genutzte Teil des Vorgehensmodells ist in Abbildung 6.1-1 dargestellt und ist eine Anwendung des Prozessabschnitts für die Konkretisierung des Zielsystems für allgemeine hochintegrierte Systeme, das in Kapitel 4 hergeleitet wurde (Abbildung 4.3-1).

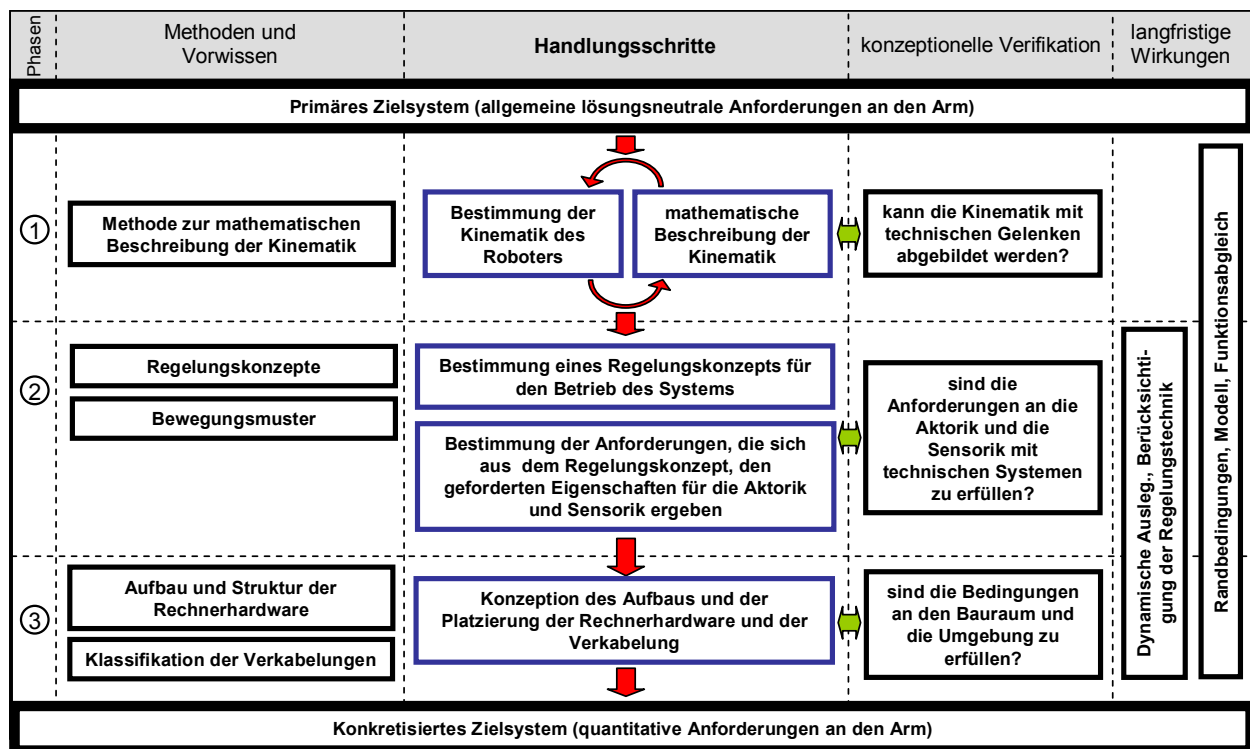


Abbildung 6.1-1: Prozessabschnitt der Konkretisierung des Zielsystems für den Arm eines humanoiden Roboters

⁸⁴ Albers / Brudniok 2005, Albers / Brudniok 2007

⁸⁵ Hahn et al. 1997

Der menschliche Körper ist ein hochkomplexes sensomotorisches System, das zum jetzigen Zeitpunkt bei weitem nicht in einem technischen System abgebildet werden kann. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Fähigkeiten, die der Roboter besitzen soll, auf ein technisch realisierbares Maß zu beschränken.

Der hier zu entwickelnde Roboter soll in Kooperation mit dem Menschen, in dessen häuslicher Umgebung, tätig sein. Primär stellt die Küche den Einsatzort des Roboters dar, in welcher er Gegenstände und Werkzeuge aus dem menschlichen Alltag benutzt. Die Handlungsszenarien des Roboters sind nicht vorgegeben. Bei diesen handelt es sich z.B. um das Be- und Entladen der Geschirrspülmaschine oder um das Decken des Tisches mit Essgeschirr und Gegenständen aus dem Kühlschrank. Hierfür benötigt er mechanische und sensorische Fähigkeiten, die es ihm ermöglichen, die Werkzeuge des Menschen einzusetzen und sich in dessen Umwelt zu orientieren. Er muss in der Lage sein, diese Tätigkeiten nach einer Aufforderung auszuführen oder durch Nachahmen selbstständig zu erlernen und durch eine wiederholte Anwendung zu verbessern. Die Kommunikation mit dem Roboter soll, ebenso wie eine normale Kommunikation zwischen Menschen, auf unterschiedlichen Ebenen stattfinden. Zum einen verbal und zum anderen optisch durch Gesten oder haptisch durch eine Berührung des Roboters. Der Roboter soll von technisch unerfahrenen Personen, z.B. von Senioren, akzeptiert werden, die unter Umständen eine Haushaltshilfe gut gebrauchen können. Dies wird zum einen durch ein menschliches Erscheinungsbild des Roboters und zum anderen durch Gesten und Bewegungen des Roboters, die dem Menschen vertraut sind, erleichtert⁸⁶. Dies bezieht sich auf den Bewegungsraum, der nicht wesentlich über den des Menschen hinausgehen soll, und auf die Anmutung der Bewegungen. Diese sollen natürlich wirken und damit ein Stück vorhersehbar sein, was für eine intuitive Akzeptanz des Roboters wichtig ist. Allgemein gilt, dass der Roboter für den Menschen prinzipiell keine Gefahr darstellen darf. Die Körperabmessungen des Roboters sollen ungefähr denen einer 50. Perzentilen Frau entsprechen. Diese Größe wurde gewählt, um dem Roboter ein unproblematisches Hantieren in einer für Menschen geschaffenen Umgebung zu ermöglichen und um keinen zu großen Roboter aufzubauen, der dem Benutzer Furcht einflößt.

Da die Abbildung der mechanischen Fähigkeiten des Menschen in einem technischen System momentan nicht zu realisieren ist, ergibt sich die Notwendigkeit, grundlegende Eigenschaften der menschlichen Kinematik zu verändern. Ein Beispiel ist die Fortbewegung des Roboters. Dies kann wie beim Menschen durch zweibeiniges Laufen realisiert werden, was beim momentanen Entwicklungsstand zu der Notwen-

⁸⁶ Zecca 2004

digkeit eines leichten Oberkörpers führt, mit dem der Roboter nur bedingt mechanische Handlungen durchführen kann. Da der hier zu entwickelnde Roboter für manipulative Arbeiten in der Küche des Menschen zu konzipieren ist, wird dieser nicht mit zwei Beinen ausgestattet. Die Fortbewegung des Roboters erfolgt mithilfe einer omnidirektional fahrbaren Plattform, auf welcher der Oberkörper des Roboters montiert wird. Diese Plattform verleiht dem Roboter eine bessere Standfestigkeit, als dies mit zwei Beinen möglich ist.

Bei solchen Vereinfachungen ist darauf zu achten, dass diese das menschliche Erscheinungsbild des Roboters nicht zu deutlich beeinträchtigen. Bei einer fahrbaren Plattform ist dies z.B. dadurch möglich, dass diese die Form eines menschlichen Unterkörpers aufweist, der mit einem Rock bekleidet ist.

6.1.1 Zielsystem für das System des Arms eines humanoiden Roboters

Dem Roboter soll es möglich sein, mit den Armen Alltagsgegenstände des Menschen, die er in der Hand hält, in der Küche zu manövrieren. Der Roboterarm muss über eine für diese Bewegungen ausreichende Kinematik verfügen.

Die Bewegungsgeschwindigkeit der Gelenkbewegungen des Roboters ist auf die von normalen Bewegungen des Menschen zu beschränken. Die Kräfte, die vom Arm ausgeübt werden können, sind von vornherein limitiert. Dem Roboter soll es möglich sein, mit ausgestrecktem Arm eine Masse von 3 kg im TCP, dem Arbeitspunkt in der Hand, statisch zu halten. Mit 1 kg in der Hand soll jedes Gelenk im Arm um 90° vom Stillstand zum Stillstand bewegt werden können.

Die Basis der seriellen Kinematik des Arms ist im Oberkörper zu platzieren. Unterhalb der Schulter steht im Torso Bauraum für Komponenten des Arms zur Verfügung. An das Handgelenk wird über eine 6-Achsen-Kraftmessdose eine Hand angeschlossen, die pneumatisch betrieben wird⁸⁷. Die dazugehörige Pumpe befindet sich im Torso des Roboters. Die bewegte Masse des Arms ist möglichst gering zu halten, um den Energieverbrauch und die in den Armbewegungen gespeicherte Energie zu verringern. An den Gelenken sind Sensoren anzubringen, um diese über eine Kraft-, Positions- und Geschwindigkeitsregelung betreiben zu können. Der Arm des Roboters ist mit einer taktilen Haut zu verkleiden, damit dieser Berührungen und die dabei ausgeübte Krafrichtung erkennen kann.

Im Prototyp des Arms sollen, was insbesondere die Aktorik und Sensorik betrifft, nach Möglichkeit Zukaufteile eingesetzt werden. Des Weiteren scheidet Fertigungsverfah-

⁸⁷ Kargov et al. 2006

ren aus, die sich aus Kostengründen erst in einer Großserienfertigung lohnen, wie der Einsatz von Gussverfahren, wofür erst eine kostspielige Gussform erstellt werden müsste. Die Bauteile des Prototyps müssen in einer konventionellen Werkstatt herstellbar sein, und es muss möglich sein, an diesen im nachhinein Veränderungen vorzunehmen. Daher ist die Konstruktion auf Materialien und Geometrien beschränkt, die mit einer spanenden Bearbeitung und mit Schweißtechniken gefertigt werden können.

6.1.2 Langfristige Wirkungen in der Entwicklung

Die hier aufgeführten Anteile aus dem Zielsystem können nicht eindeutig einzelnen Entwicklungsphasen zugeordnet werden, sondern sind begleitend zum gesamten Prozess zu beachten.

6.1.2.1 Bauraum

Der Bauraum für die Anbringung der Arme am Körper des Roboters ist in Abbildung 6.1-2 dargestellt. Dieser trennt sich in einen oberen und einen unteren Bereich auf. Der obere Bereich steht für die Basis der beiden Schultern und des Halses zu Verfügung, und der untere Bereich ist für aus dem Arm ausgelagerte Komponenten vorgesehen. Diese teilen sich den Bauraum mit einer Rechneinheit pro Arm und Komponenten der Spannungsversorgung (vgl. Abbildung 6.1-2). Jede Rechneinheit benötigt einen Bauraum mit den Abmessungen: Länge = 96 mm, Breite = 90 mm und Höhe = 111 mm. Der Torso selbst ist als starrer Körper aufgebaut, der im Inneren hohl ist. Anschlussleitungen für die Spannungsversorgung und die Rechneinheiten des Unterkörpers sind mittig durch den Oberkörper zu leiten.

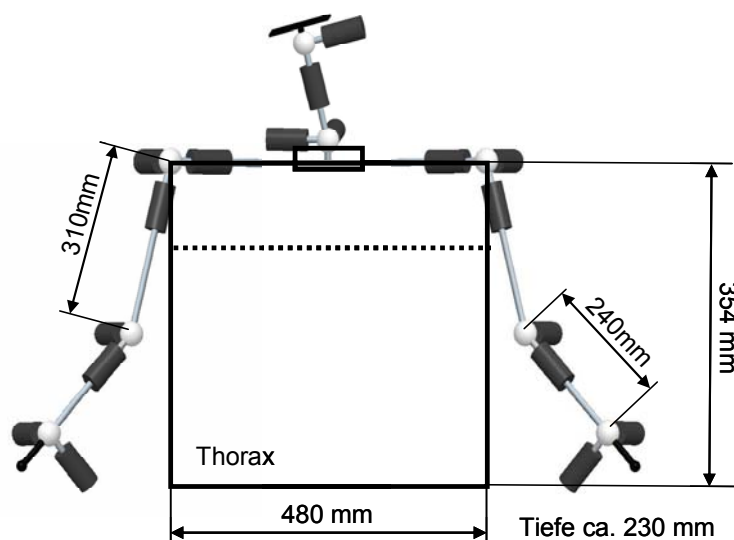


Abbildung 6.1-2: Bauraum im Torso des Roboters für die Anbringung der Arme

6.1.2.2 Leichtbau

Eine Verbesserung der dynamischen Eigenschaften des Roboters – bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauchs – ist über eine Verringerung der bewegten Massen zu erreichen. Aus diesem Grund ist der Leichtbau des humanoiden Roboters ein Kernziel bei dessen Entwicklung. Schmidt beschreibt sechs Maßnahmen, die auf eine Verringerung der Masse hinwirken und weist ihnen ungefähre Bereiche im Entwicklungsprozess zu, in denen sie angewandt werden können⁸⁸.

Konzeptphase

- Mit Maßnahmen, die über eine Veränderungen des Konzepts einen leichteren Aufbau ermöglichen, lassen sich die deutlichsten Gewichtsverringerungen bewirken.

Entwurf und Ausarbeitung

- Gewichtsverringerung durch eine Veränderung der Bauform der Werkstücke.
- Bessere Werkstoffausnutzung durch genauere Kenntnisse der Belastungen und der Bedingungen im und am Werkstoff.
- Gewichtsverringerung durch Auswahl von angepassten Werkstoffen.
- Einsatz von modernen Verbundwerkstoffen, die eine deutliche Gewichtsverringerung ermöglichen.
- Ausnutzung der Fertigungsverfahren, die zur Verfügung stehen und eventuell sinnvoll miteinander zu kombinieren sind.

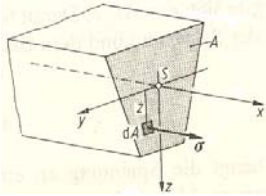
Bei der Konzeption eines gewichtsoptimierten seriellen Mehrkörpersystems ist darauf zu achten, dass sich die Massen der untergeordneten Gelenkkomplexe überproportional auf die Antriebsleistung auswirken, da sie von allen übergeordneten Drehachsen mitbewegt werden („Schneeballeffekt“). Daher ist es wichtig, in der Konzeptphase massebehaftete Komponenten an Tragstrukturen anzubringen, die sich nahe an der Basis des Mehrkörpersystems befinden, oder die Komponenten aus dem Mehrkörpersystem auszulagern.

6.1.2.3 Werkstoffe und Fertigungsverfahren

Der TCP in der Roboterhand soll über eine Messung der Gelenkwinkel im Arm möglichst exakt im Raum zu bestimmen sein. Daher sollen die Tragstrukturen eine hohe Steifigkeit aufweisen, um systematische Fehler aufgrund von Verformungen zu verringern. Die Steifigkeit ist ein Kennwert, der von Werkstoffeigenschaften und von der Geometrie der betrachteten Querschnittsfläche abhängig ist und beschreibt die Verformung eines Körpers unter Belastung. Aufgrund der Belastungen am Arm des

⁸⁸ Schmidt 2003 - S.107-109

Roboters sind vor allem die Biegesteifigkeit und die Torsionssteifigkeit von Interesse. Die Biegesteifigkeit ist das Produkt aus dem Elastizitätsmodul E des benutzten Werkstoffes und dem axialen Flächenträgheitsmoment I_y ⁸⁹. Unter der Annahme, dass aufgrund der Biegung des Balkens die internen Verformungen zu vernachlässigen sind, ergibt sich folgende Differentialgleichung für die Biegelinie. Die Durchbiegung ω wird über der Koordinate x entlang der Längsachse des Balkens betrachtet:



$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = -\frac{M_y(x)}{EI_y} \quad \text{Formel 6.1-1}$$

mit dem axialen Flächenträgheitsmoment I_y :
$$I_y = \int_A z^2 dA$$

Die Torsionssteifigkeit ist das Produkt aus dem Schubmodul G des benutzten Werkstoffes und dem Flächenträgheitsmoment I_p . Für die Verdrehung aufgrund eines Torsionsmoments M_T ergibt sich die Differentialgleichung:

$$\frac{d\vartheta(x)}{dx} = \frac{M_T(x)}{GI_p} \quad \text{Formel 6.1-2}$$

mit dem polaren Flächenträgheitsmoment I_p :
$$I_p = \int_A r^2 dA$$

Aus diesen Gleichungen geht hervor, dass Werkstoffe mit einem hohen Elastizitäts- und Schubmodul für eine hohe Steifigkeit wünschenswert sind und dass die Tragstruktur geometrisch einen großen Abstand zur zentralen Drehachse aufweisen soll. Dies führt letztendlich in Kombination mit den geometrischen Möglichkeiten des Arms zu einer hohlen Tragstruktur entlang der Außenform des Arms, in deren Inneren die zusätzlichen Komponenten des Antriebs und der Sensorik untergebracht sind.

An dem hier zu entwickelnden Prototypen müssen im Nachhinein noch Änderungen möglich sein. In nachträglich bearbeiteten Bauteilen verändert sich die Krafrichtung. Daher sind anisotrope Werkstoffe, die nur eine erhöhte Belastung in bestimmten Krafrichtungen ermöglichen, für solche Bauteile nur bedingt nutzbar.

Im momentanen Entwicklungsstadium des Roboters werden für die Tragstrukturen Standardhohlprofile gewählt, die an die Gegebenheiten anzupassen sind. Moderne Werkstoffe, wie z.B. Faserverbundstoffe, kommen, obwohl sie sehr gute Steifigkeitswerte bei geringem Eigengewicht aufweisen, für diesen Prototyp nicht in Frage, da sie mit Standardverfahren nicht zu verarbeiten sind und keine nachträgliche Bearbeitung zulassen. Solche Werkstoffe können in einer zukünftigen Version der Arme eingesetzt werden.

⁸⁹ Gross et al. 2005

Von dem für die Tragstruktur genutzten Material wird gefordert, dass es gut spanend zu bearbeiten ist, eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte aufweist und schweißbar ist. Des Weiteren müssen in dieses Material Konturen eingearbeitet werden, die eine hohe Maßtoleranz aufweisen, wie sie für die Lagersitze in den Gelenken und Getrieben benötigt werden. Diese Anforderungen werden von der hochfesten Aluminiumlegierung AlZnMgCu1,5 erfüllt. Dieses Material weist eine Zugfestigkeit von $R_m = 570 \text{ N/mm}^2$, eine 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2} = 450 \text{ N/mm}^2$, ein E-Modul $E = 71000 \text{ N/mm}^2$ und eine Dichte von $\rho = 2,78 \text{ g/cm}^3$ auf⁹⁰. Alle Systemelemente der Tragstruktur des humanoiden Roboters werden im Weiteren standardmäßig aus diesem Material gefertigt.

6.1.2.4 Sicherheitskonzept

Roboter, in deren direkter Umgebung sich Menschen aufhalten, dürfen für diese keine Gefahr darstellen. Bei diesen Gefährdungen ist zwischen stochastischen Gefährdungen, die sich auf zufällige Bauteilausfälle bzw. -versagen beziehen, und deterministischen Gefährdungen, die sich auf systematische Unzulänglichkeiten bzw. Fehler beziehen, zu unterscheiden⁹¹. Die stochastischen Gefährdungen hängen mit der Zuverlässigkeit der Komponenten im System zusammen. Da es sich bei dem hier zu entwickelnden System um einen Prototypen handelt, der in der Forschung eingesetzt wird, spielen Ziele bezüglich einer dauerhaften Zuverlässigkeit eine untergeordnete Rolle. Systematischen Fehlern ist mit drei aufeinander aufbauenden Sicherheitstechniken zu begegnen. Dies ist die unmittelbare, mittelbare und hinweisende Sicherheitstechnik⁹¹. Die Anwendung der unmittelbaren hat eine Vermeidung der gefährdenden Situationen zur Folge, die mittelbare vermindert die Gefahren, wenn solch eine Situation auftritt und die hinweisende macht auf diese Gefahren aufmerksam. Wenn möglich sollen Gefahren, die vom Roboter ausgehen, durch eine Anwendung der unmittelbaren Sicherheitstechnik vermieden werden. Ein Beispiel hierfür ist, dass durch eine ungewollte Unterbrechung der Antriebsleistung des Roboters dem Menschen und dem Roboter keine Gefahr durch unkontrollierte Bewegungen entsteht. Daher ist dafür zu sorgen, dass die Antriebe der Arme und insbesondere die in der Schulter eine ausreichende Dämpfung aufweisen, aufgrund deren der nicht angetriebene Arm nur langsam herabsinken kann. Weiterhin kann der Roboter im normalen Betrieb die Position des Menschen über Sensoren wahrnehmen und daraufhin eine Kollision aktiv vermeiden. Eine Verringerung der Gefährdung des Menschen bei einer Kollision, also eine mittelbare Sicherheit, ist z.B. durch elastische Elemente im

⁹⁰ Aluminium 2003

⁹¹ Neudörfer 2005 - S.142-143

Antriebsstrang möglich, die hierbei dämpfend wirken, oder durch den Einsatz von Sensoren, die eine Kollisionen erkennen und eine schnell durchzuführenden Gegenbewegung auslösen. Eine Verringerung der bei einer Kollision übertragenen Energie, durch kleine bewegte Massen und einer geringen Bewegungsgeschwindigkeit, sind ebenfalls Anwendungen der mittelbaren Sicherheit. Auf das Anbringen von Hinweisen, also der hinweisenden Sicherheit, wird bei dem hier aufzubauenden Roboter verzichtet, da der Prototyp nur in der Umgebung von Fachpersonal mit dem notwendigen Gefahrenbewusstsein eingesetzt wird.

6.2 Armkinematik des humanoiden Roboters

6.2.1 Anthropomorphe Armkinematik

Die Kinematik des menschlichen Arms ist für den humanoiden Roboter in eine menschenähnliche Kinematik umzuwandeln, die geregelt betrieben und mit Technischen Gelenken und Antrieben aufgebaut werden kann. Für die Gelenke gelten die in Kapitel 5.2.1 aufgeführten Bedingungen.

Die Bewegungen im natürlichen Skelett des Menschen ergeben sich aus den Bauformen der Gelenkflächen, die sich in einem Gelenk gegenüberstehen⁹². Bei echten Gelenken werden die Gelenkpartner von Knochen gebildet, die mit einer Knorpelmasse überzogen sind. In dem Gelenkspalt befindet sich eine viskose Flüssigkeit. Umhüllt werden diese Gelenke von der Gelenkkapsel. Im Arm des Menschen existieren 5 verschiedene Arten echter Gelenke (Tabelle 6.2-1):

- Das Kugelgelenk (*articulatio spherioidea*), das z.B. im Schultergelenk (*articulatio humeri*) vorkommt und Drehbewegungen um drei Achsen bereitstellt.
- Das Ellipsoid- oder Eigelenk (*articulatio ellipsoidea*), das dem proximalen Handgelenk (*articulatio radiocarpalis*) entspricht und diesem eine Pitch- und eine Yaw-Bewegung ermöglicht.
- Das Sattelgelenk (*articulatio sellaris*), in dem z.B. der Daumen in zwei Richtungen gebogen werden kann (*articulatio carpometacarpalis*).
- Das Scharniergelenk (*articulatio ginglymus*), über das z.B. im Ellbogen der Humerus und die Ulna eine Pitch-Bewegung durchführen.
- Das Roll-, Rad- oder Zapfengelenk (*articulatio trochoidea*), in dem sich z. B. der Radius im Unterarm um die Längsachse drehen kann (*articulatio radioulnaris proximalis*), was einem Verdrehen des Radius zur Ulna bei einer Drehung des Unterarms entspricht.

⁹² Kapandji 1985



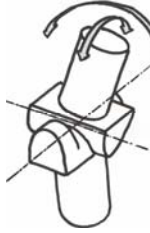

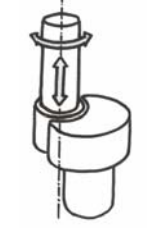
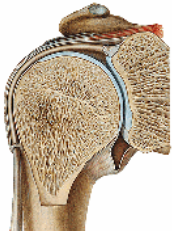
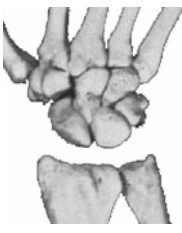



	Kugelgelenk	Ellipsoidgelenk	Sattelgelenk	Scharniergelenk	Zapfengelenk
Gelenkform					
Beispiel					

 Tabelle 6.2-1: Echte Gelenke des Menschen mit Beispielen aus dem Arm⁹³

Die Gelenke des Menschen lassen sich beim derzeitigen Stand der Technik nur bedingt in Technische Gelenke in einem vergleichbaren Bauraum umwandeln. Gründe hierfür sind:

- In einem natürlichen Gelenk befindet sich zwischen den Gelenkflächen eine bis zu mehreren Millimetern dicke Knorpelschicht. Diese Knorpelschicht wird bei Belastung zusammengedrückt, wodurch die kraftübertragende Fläche größer wird. Damit verändert der Drehpunkt eines natürlichen Gelenks unter Belastung seine Lage, was in Technischen Gelenken schwer nachzubilden und für eine exakte Bestimmung der räumlichen Lage des Endeffektors unerwünscht ist.
- Die Drehpunkte natürlicher Gelenke verlagern sich während einer Bewegung, da es sich bei den Gelenkflächen nicht um ideale konvexe oder konkave Flächen handelt.
- Wirbeltiere weisen Gelenke auf, für die kein technisches Äquivalent existiert. Hierbei handelt es sich z.B. um unechte Gelenke, die keine Gelenkflächen enthalten, sondern durch Gewebe gebildet werden. Ein Beispiel hierfür ist das Schulterblatt, das über ein unechtes Gelenk mit dem Thorax verbunden ist und auf diesem entlang einer Ebene um eine kleine Länge zu verschieben ist, sich um einen kleinen Winkel um sich selbst drehen und ein kleines Stück vom Thorax abheben kann.
- Für viele natürliche Gelenke, insbesondere für Kugelgelenke, steht in dem begrenzten Bauraum keine Antriebsmöglichkeit zur Verfügung. Daher werden solche Gelenke mit Ersatzgelenken nachgebildet, die aus einer Hintereinanderschäl-

⁹³ Rauber 1987 ; Schünke et al. 2004

tion von Einzelgelenken bestehen und oft über einen kleineren Bewegungsraum als das Original verfügen.

- Ersatzgelenke, die aus einer Hintereinanderschaltung von mehreren Gelenken mit einem Freiheitsgrad bestehen, weisen oftmals Gelenkstellungen auf, in denen zwei Drehachsen zueinander koaxial ausgerichtet sind. In diesen Positionen ist ein Weiterbewegen des Gelenks nicht mehr eindeutig, und dynamische Bewegungen in der Nähe dieser Stellungen können aufgrund der sich daraus ergebenden Umorientierung der Drehachsen zu Beschädigungen im Gelenk führen („Joint Flipping“).

Es werden verschiedene Vorgehensweisen dafür angewandt, eine natürliche Kinematik in eine technische Ersatzkinematik zu überführen. In einer Vorgehensweise werden die natürlichen Knochen in einem stark vereinfachten virtuellen Stabmodell als seriell hintereinander geschaltete Stäbe abgebildet. Mithilfe einer Durchführung der gewünschten Bewegungen am Modell lassen sich die dafür notwendigen Gelenke und Bewegungsräume erkennen. Schulz⁹⁴ beschreibt so die Anzahl der aktiven und passiven Freiheitsgrade der Hand, um damit bestimmte Griffarten durchführen zu können.

Ziel einer weiteren Vorgehensweise ist, die natürliche Kinematik unter Verwendung von Vereinfachungen möglichst exakt abzubilden. Bei diesen Vereinfachungen handelt es sich z.B. um die Beschränkung auf Drehgelenke mit konstantem Drehpunkt. Abhängigkeiten im System werden über Zwangsbedingungen zwischen Gelenkwinkeln nachgebildet. Dies geschieht im stetigen Abgleich mit den natürlichen Bewegungen, um den Bewegungsraum des Modells den natürlichen Gegebenheiten anzupassen. Schäfer leitet auf diese Weise eine Ersatzkinematik für den menschlichen Arm ab⁹⁵, die einen zum Menschen ähnlichen Bewegungsraum aufweist und über eine ähnliche Kraftleitung verfügt. Im Arm sind in diesem Modell die Mehrfachgelenke Schultergürtel, Schultergelenk, Ellbogengelenk und Handgelenk enthalten. Die geschlossene kinematische Kette des menschlichen Schultergürtels wird von Schäfer zwischen dem Schulterblatt und dem Thorax geöffnet, da hierfür kein Gelenk

zur Verfügung steht. Der Bewegungsbereich im Schultergürtel wird durch vorgegebene Maximalstellungen und durch Kopplungen der beteiligten Gelenke eingeschränkt, um die Bewegungen denen des Menschen anzugleichen. Schäfer bestimmt auf diese Weise ein Ersatzmodell für den gesamten menschlichen Arm mit 10 Freiheitsgraden (Abbildung 6.2-1).

⁹⁴ Schulz 2003

⁹⁵ Schäfer 2000

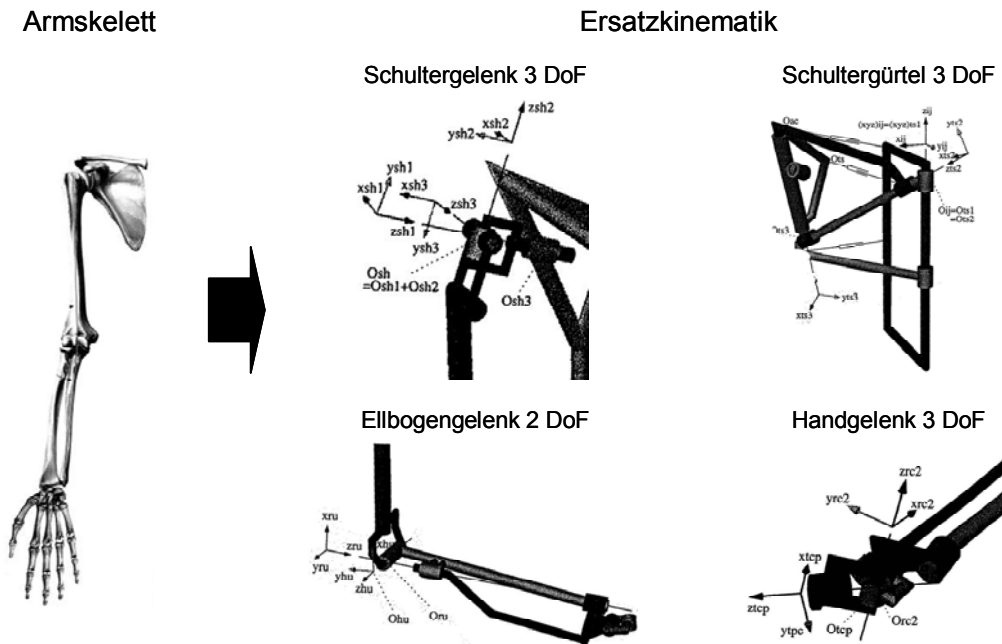


Abbildung 6.2-1: Umwandlung der menschlichen Armkinematik in eine technische mit 10 DoF⁹⁵

Für die meisten Tätigkeiten, die humanoide Roboter durchführen sollen, ist es nicht zwingend notwendig, dass die Kinematik des Roboters exakt der Kinematik des Menschen entspricht, da nicht der gesamte Bewegungsraum des menschlichen Arms benötigt wird. Demnach ist für die Bewältigung von vielen Aufgaben eine Kinematik mit signifikanten Einschränkungen gegenüber dem Menschen ausreichend, was deren Umsetzung in ein technisches System vereinfacht. Auf diese Weise bestimmt Asfour⁹⁶ die Anzahl der Freiheitsgrade und den Bewegungsraum des Arms eines humanoiden Roboters in einer seriellen Kinematik, bestehend aus hintereinander geschalteten Drehgelenken (Abbildung 6.2-2). In diesem Modell sind im Handgelenk zwei, im Ellbogengelenk zwei, im Schultergelenk drei und im Schultergürtel zwei Freiheitsgrade enthalten. Ein weiteres Roll-Gelenk kann sich optional zwischen dem Schultergürtel und dem Schultergelenk befinden, da dieses Gelenk ein nach vorne, bzw. hinten Schwingen des Arms in jeder Stellung des Schultergelenks ermöglicht.

Die Arme der heutzutage existierenden humanoiden Roboter besitzen keinen Schultergürtel. Der Aufbau eines Schultergürtels stellt große Anforderungen an das mechanische System, das in einem beschränkten Bauraum zu integrieren ist, und an die Regelung, da die Kinematik eine drei- bis vierfache Redundanz beinhaltet.

⁹⁶ Asfour 2003

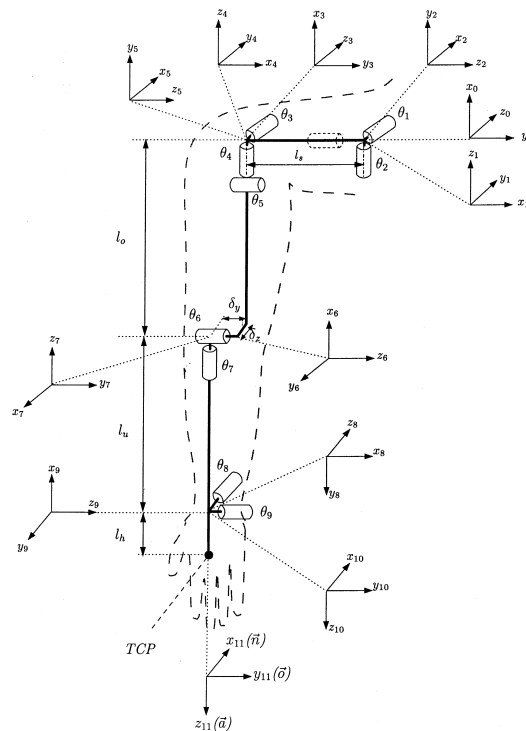


Abbildung 6.2-2: Kinematik des Arms des humanoiden Roboters mit 9 und optional mit 10 Freiheitsgraden⁹⁷

6.2.2 Entwurf der Kinematik

In diesem Kapitel werden die Mehrfachgelenke des Roboterarms mit deutlichen Vereinfachungen aus den menschlichen Mehrfachgelenken hergeleitet. Bei diesen Vereinfachungen handelt es sich um (Kapitel 5.2):

- Beschränkung auf fluchtende und nicht fluchtende Drehgelenke mit einem Freiheitsgrad, die zu höherwertigen Mehrfachgelenken kombiniert werden können, und auf Kugelgelenke mit drei Freiheitsgraden.
- Die Einzelgelenke und Mehrfachgelenke werden seriell zu dem Mehrkörpersystem des Arms zusammengesetzt.
- Die Drehachsen der in einem Mehrfachgelenk aufeinander folgenden Einzelgelenke stehen senkrecht aufeinander.
- Die Drehachsen der Gelenke in einem Mehrfachgelenk schneiden sich in einem Punkt.
- Der Drehpunkt eines Gelenks ändert seine Lage durch die Bewegung des Gelenks nicht.
- Armstellungen, in denen Drehachsen zueinander koaxial sind, sind im Hauptarbeitsbereich des Roboters zu vermeiden.

⁹⁷ Asfour 2003

Im Folgenden wird die Kinematik des Arms, ausgehend vom Handgelenk, bestimmt. Die Gelenkwinkel des Menschen werden, wenn nichts Anderweitiges angemerkt ist, in der Neutral-Null-Stellung angegeben. Dies entspricht der Körperhaltung, die ein Mensch einnimmt, wenn er gerade steht und die Arme mit nach vorne ausgerichteten Daumen herab hängen.

Handgelenk

Beim proximalen Handgelenk des Menschen (Handwurzelgelenk) (Abbildung 6.2-3) handelt es sich um ein Ellipsoid oder Eigelenk (*articulatio ellipsoidea*) mit zwei sich gegenüberliegenden ellipsenförmigen Flächen, einer konvexen und einer konkaven. Dieses Gelenk verfügt über zwei Freiheitsgrade. Die Dorsalextension und Palmarflexion erfolgt um die transversale Bewegungsachse und die Radial- und Ulnarabduktion um die dorsal-palmare Bewegungsachse. Beide Drehachsen sind mit Versatz senkrecht zueinander angeordnet. Die transversale Drehachse geht durch den Handwurzelknochen *Os lunatum* und die dorsal-palmare Drehachse durch den dahinter liegenden Handwurzelknochen *Os capitatum*. Die transversale Drehachse ist der dorsal-palmaren um ca. 20 mm vorgelagert, woraus sich ein elliptischer Bewegungsraum ergibt.

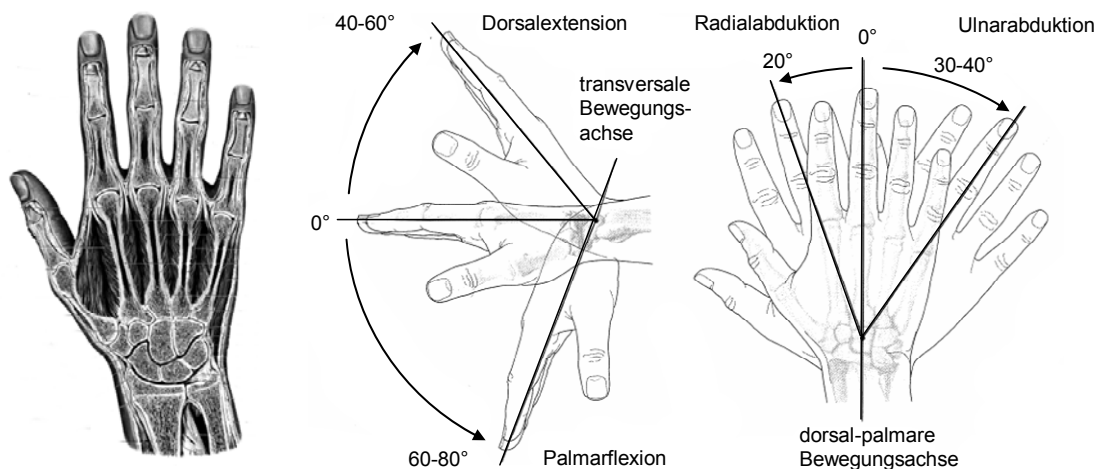


Abbildung 6.2-3: Bewegungsraum im menschlichen Handgelenk⁹⁸

Die Winkelbewegungen, die vom Handgelenk erreicht werden, sind in Tabelle 6.2-2 dargestellt.

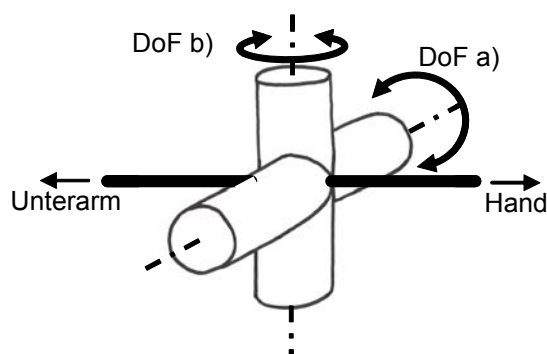
⁹⁸ Schünke et al. 2004 - S.255

transversale Bewegung des Handgelenks	
Dorsalextension	40° - 60°
Palmarflexion	60° - 80°
dorsal-palmare Bewegungsachse	
Radialabduktion	20°
Ulnarabduktion	30° - 40°

Tabelle 6.2-2: Winkelbeweglichkeiten in beiden Drehachsen des menschlichen Handgelenks

Handgelenk des Roboters

Eine Bewegung der Hand, um zwei Drehachsen im Handgelenk, ist für verschiedene Griffarten und zum Manövrieren von in der Hand gehaltenen Gegenständen notwendig. Aufgrund des eingeschränkten Bauraums im Handgelenk weisen beide Drehachsen im Modell keinen Versatz zueinander auf, da dies eine Abbildung in einem Technischen Gelenk vereinfacht (Abbildung 6.2-4). Die Winkelbewegungen der Drehachsen im Modell sind symmetrisch um die Nulllage verteilt. Dies ist konform mit den Winkelbewegungen des menschlichen Vorbilds, und das so aufgebaute Handgelenk kann ohne Änderung im linken und rechten Arm genutzt werden.



Freiheitsgrad	Winkelbeweglichkeit
DoF a)	-60° - 60°
DoF b)	-30° - 30°

Abbildung 6.2-4: Drehachsen und Winkelbeweglichkeit des Handgelenkmodells

Ellbogengelenk

Mit dem Humeroulnargelenk im Ellbogengelenk des Menschen, bei dem es sich um ein Scharniergelenk handelt, umschließt die Ulna den Humerus und ermöglicht die Flexion und Extension des Unterarms zum Oberarm (Abbildung 6.2-5). Der Kubitalwinkel zwischen der Ulna und dem Humerus beträgt in der Supinationsstellung des Unterarms 170°.

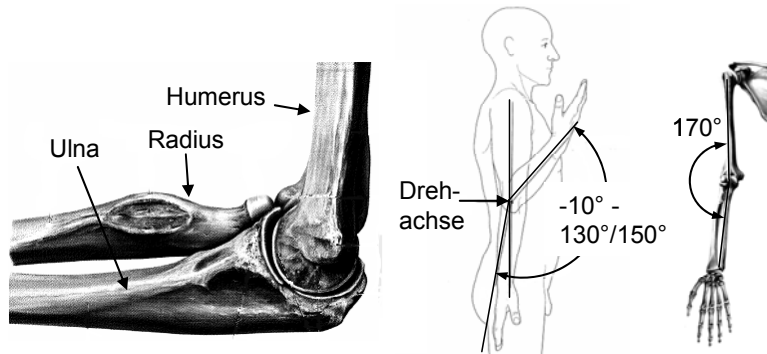


Abbildung 6.2-5: Ellbogen des Menschen in Flexions- und Extensionsstellung⁹⁹

Bei einer Drehung des Unterarms in die Pronationsstellung verändern die Ulna und der Radius ihren relativen Winkel um 5°⁹⁹(Abbildung 6.2-6).

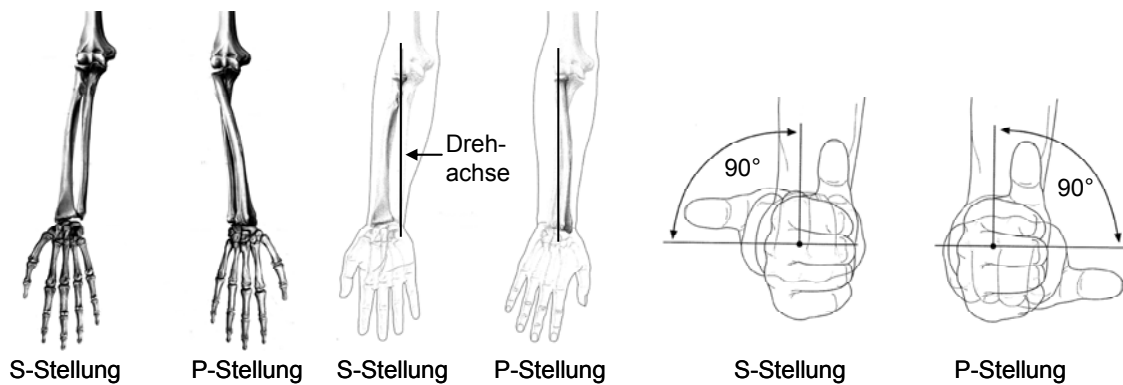


Abbildung 6.2-6: Unterarm des Menschen in Supinations- (S) und Pronationsstellung (P)

In Tabelle 6.2-3 sind die Bewegungsräume der beiden Gelenke im Ellbogen enthalten.

Flexion Ellbogen	
Flexionsstellung	130° - 150°
Extensionsstellung	-10°
Drehung Unterarm	
Supinationsstellung	90°
Pronationsstellung	90°

Tabelle 6.2-3: Winkelbeweglichkeit des Menschen in beiden Drehachsen des Ellbogengelenks

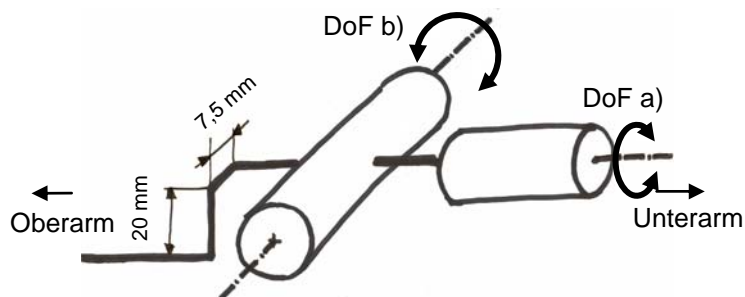
In der menschlichen Anatomie vollzieht sich die Unterarmdrehung, indem ausgehend von der Supinationsstellung, in der die Unterarmknochen Radius und Ulna parallel ausgerichtet sind, der Radius die Ulna überkreuzt und der Unterarm damit die Pronationsstellung erreicht. Um diese Bewegung um 180° zu ermöglichen, können sich der Radius im distalen und die Ulna im proximalen Radioulgargelenk um ihre Längsachse drehen. Der Unterarm des Menschen weist, wenn der Arm senkrecht

⁹⁹ Schünke et al. 2004 - S.244-245

nach unten hängt, einen Versatz nach vorne und zur Seite gegenüber dem Oberarm auf. Dies erhöht den Bewegungsraum in der Flexionsstellung des Unterarms.

Ellbogengelenk des Roboters

Das Ellbogengelenk des Roboters wird als eine Reihenschaltung aus einem nicht fluchtenden und einem fluchtenden Gelenk, die senkrecht aufeinander stehen, aufgebaut (Abbildung 6.2-7). Der sich im Verlauf einer Unterarmdrehung ändernde Kubitalwinkel wird in diesem Modell konstant auf 180° gesetzt. Der Versatz der Achsen des Oberarms zur Achse des Unterarms beträgt, in Anlehnung an die geometrischen Bedingungen im menschlichen Ellbogengelenk, 20 mm nach vorne (anterior) und 7,5 mm zur Seite (lateral). Aufgrund dieses Versatzes sind die Drehachsen der Ober- und Unterarmdrehung nie koaxial zueinander. Die Winkelbeweglichkeit für die Drehung des Unterarms wurde im Modell gegenüber dem natürlichen Arm deutlich vergrößert, um dadurch einfachere Ausgleichbewegungen mit Gegenständen in der Hand durchführen zu können, was der Mensch mit einem geschickten Umlagern von gehaltenen Gegenständen in der Handfläche erreicht, was dem Roboter so nicht möglich ist.



Freiheitsgrad	Winkelbeweglichkeit
DoF a)	$-120^\circ - 120^\circ$
DoF b)	$-10^\circ - 155^\circ$

Abbildung 6.2-7: Drehachsen und Winkelbeweglichkeit des Ellbogengelenkmodells des linken Arms

Schultergelenk

Durch das Kugelgelenk in der Schulter des Menschen kann sich der Humerus aus jeder Position im Rahmen seiner Bewegungsmöglichkeiten in alle Richtungen drehen. Die zugehörigen Gelenkwinkel sind in Abbildung 6.2-8 dargestellt und in Tabelle 6.2-4 aufgelistet.

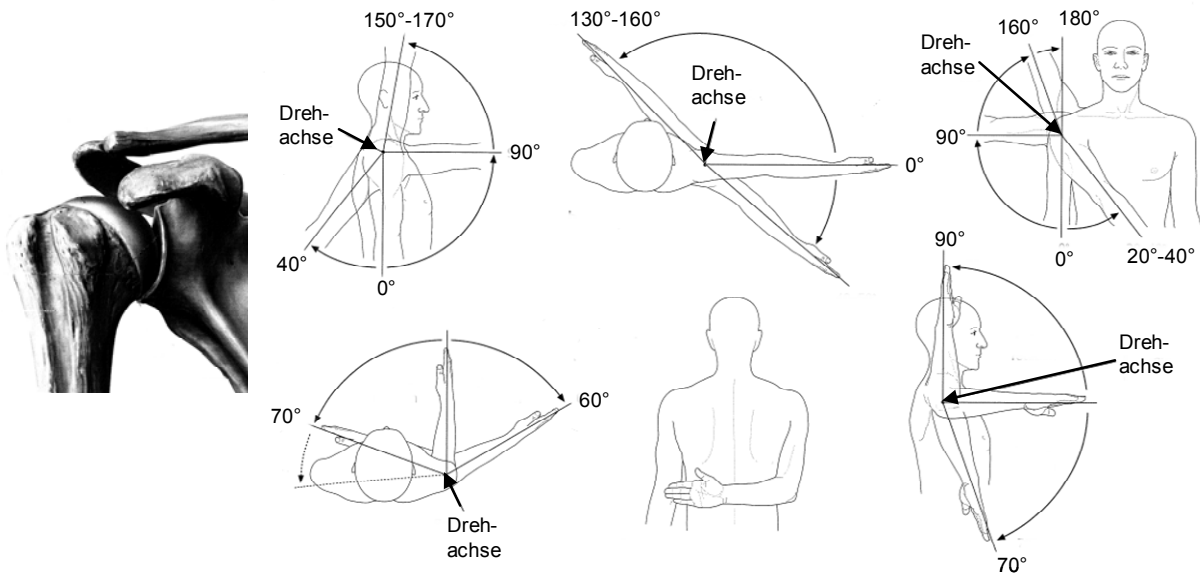


Abbildung 6.2-8: Schultergelenk des Menschen und dessen Bewegungsraum¹⁰⁰

Arm nach vorne und nach hinten bewegen („Schwenken“)	
Anteversionsbewegung	150° - 170°
Retroversionsbewegung	40°
Arm seitlich nach oben und seitlich vor den Körper bewegen („Heben“)	
Abduktionsbewegung	160°
Adduktionsbewegung	20° - 40°
Drehung Oberarm	
Außenrotation	90°
Innenrotation	70°

Tabelle 6.2-4: Winkelbeweglichkeit des Menschen in drei Drehachsen des Schultergelenks

Schultergelenk des Roboters

Das Schultergelenk ist das beweglichste Gelenk im menschlichen Körper. Zum jetzigen Zeitpunkt existiert noch kein Antrieb für ein Kugelgelenk, der in den Bauraum der Schulter passt und dort über die geforderte Leistungsfähigkeit verfügt¹⁰¹. Aus diesem Grund ist es notwendig, das Kugelgelenk mit einem Ersatzgelenk, das aus seriell angeordneten Einzelgelenken besteht, nachzubilden. Das Gelenk soll einen zum Menschen ähnlichen Bewegungsraum aufweisen und der Antrieb ist in den zur Verfügung stehenden Bauraum zu integrieren. Dieses Mehrfachgelenk kann mit verschiedenen Einzelgelenkenkombinationen erzeugt werden (Kapitel 5.2.3.2). Zu bevorzugen ist hierbei das Mehrfachgelenk, das den größten Bewegungsraum

¹⁰⁰ Schünke et al. 2004

¹⁰¹ Busch et al. 2001

aufweist und im direkten Arbeitsbereich, d.h. vor dem Körper des Roboters, über keine Singularität verfügt. Dies ermöglicht eine Kombination aus einem fluchtenden, einem nicht fluchtenden und noch einem weiteren fluchtenden Gelenk (Abbildung 6.2-9).

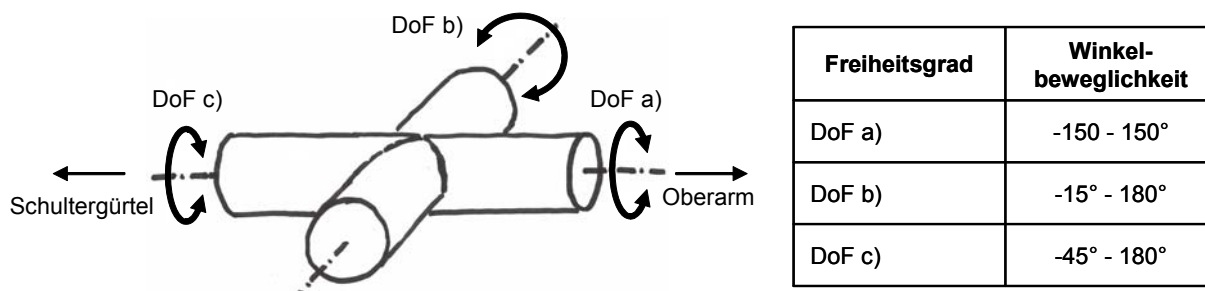


Abbildung 6.2-9: Drehachsen und Winkelbeweglichkeit des Schultergelenkmodells

Schultergürtel

Die Bewegungen des menschlichen Schultergelenks sind mit den Bewegungen des Schultergürtels gekoppelt. Das Heben des Arms erfolgt bis zur Horizontalen aus dem Schultergelenk und darüber durch ein Anheben des Schultergürtels. Durch die Bewegung des Schultergürtels ist es dem Menschen möglich, mit der Hand an der Brust vorbei hinter sich zu greifen. Der Schultergürtel besteht aus dem Schlüsselbein (Clavicula), das über ein Kugelgelenk mit dem Brustbein verbunden ist und an dessen anderem Ende ebenfalls über ein Kugelgelenk das Schulterblatt (Scapula) angeschlossen ist. Das Schulterblatt liegt eben auf der Hinterseite des Brustkorbs auf und hat zu diesem einen großflächigen Kontakt. Der Schultergürtel erlaubt eine Bewegung des Schultergelenks um zwei Freiheitsgrade, ungefähr entlang eines Kreisabschnitts. Die beiden Drehachsen verlaufen vertikal und horizontal im Körper und schneiden sich auf der Höhe des Schultergelenks, nahe der Körpermitte (Abbildung 6.2-10); die maximalen Gelenkbewegungen, die dabei erreicht werden sind in Tabelle 6.2-5 aufgeführt.

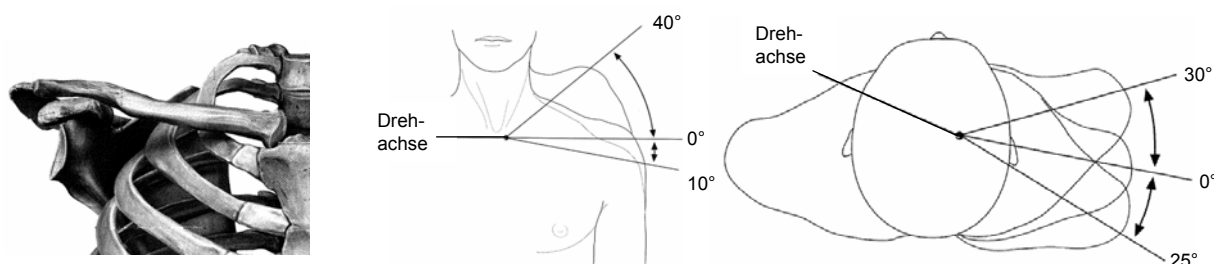


Abbildung 6.2-10: Bewegungsraum des menschlichen Schultergürtels¹⁰²

¹⁰² Schünke et al. 2004

Heben und Senken der Schulter	
Elevation	40°
Depression	10°
Vor- und Rückführung der Schulter	
Protraktion	30°
Retraktion	25°

Tabelle 6.2-5: Winkelbeweglichkeit des Menschen in zwei Drehachsen des Schultergürtels

Schultergürtel des Roboters

Der Schultergürtel kann als ein Ersatzgelenk mit zwei Drehachsen nachgebildet werden, deren Drehpunkte sich im Körper neben dem Zentrum schneiden¹⁰³ (Abbildung 6.2-11). Für den Aufbau des Schultergürtels, in dem die größten Momente im Arm wirken, steht nur ein begrenzter Bauraum im Oberkörper des Roboters zur Verfügung. Da der hier zu entwickelnde Roboter für die Verrichtung der vorgesehenen Tätigkeiten keinen durch einen Schultergürtel erweiterten Bewegungsraum benötigt, wird hier auf einen Schultergürtel verzichtet. Um die Einschränkung des Bewegungsraums etwas auszugleichen, kann der Roboter seinen Arm im Schultergelenk um Winkelbereiche bewegen, für die der Mensch noch zusätzlich den Schultergürtel einsetzt. So ist es dem Roboter möglich, rein aus einer Bewegung des Schultergelenks senkrecht nach oben zu greifen. Die resultierenden Schulterbewegungen wirken zwar nicht mehr so menschlich, dies ist aber aufgrund des eingeschränkten Bedarfs für diese Bewegungen akzeptabel.

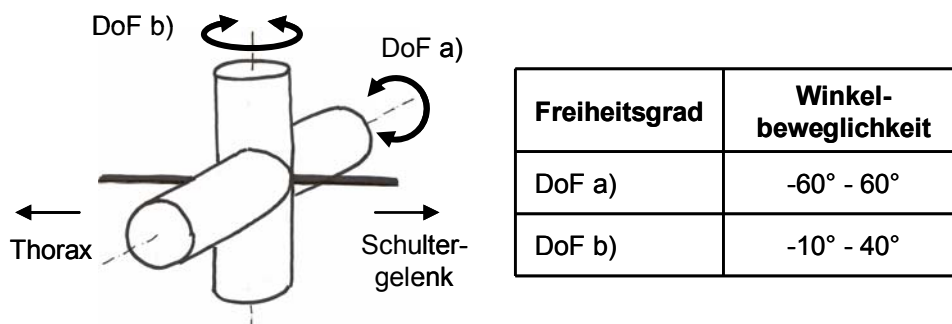


Abbildung 6.2-11: Drehachsen und Winkelbeweglichkeit des Schultergürtelmodells

Drehachsen im Arm des Roboters

Insgesamt ergeben sich hieraus sieben Drehachsen im Arm des Roboters, deren Anordnung in Abbildung 6.2-12 zu erkennen ist.

¹⁰³ Tondur 2005

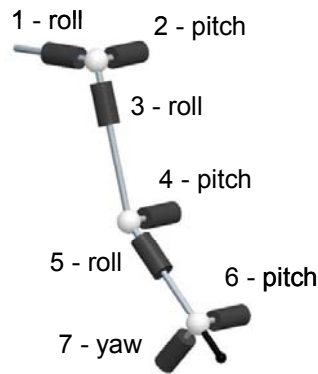


Abbildung 6.2-12: Drehachsen im Arm des Roboters

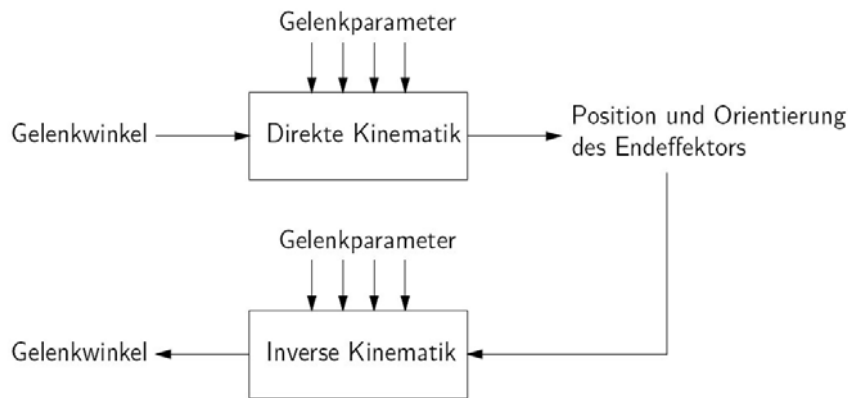
6.2.3 Inverse Kinematik

Mit in die Planung des Mehrkörpersystems gehen grundlegende Überlegungen über die Steuer- und Regelbarkeit ein. Bevor die Kinematik, die sich aus Überlegungen zu den Bewegungen und den Gelenken des Roboters ergeben hat, in ein reales Mehrkörpersystem umgesetzt wird, ist abzuklären, ob dieses System geregelt betrieben werden kann. Hierfür ist es notwendig, dass für diese Kinematik die inverse Kinematik existiert, mit der jeder Ort im Bewegungsraum mit dem TCP mit eindeutigen Gelenkstellungen angefahren werden kann. Wenn dies nicht der Fall ist, ist die Kinematik des Systems zu ändern.

Entscheidend für die inverse Kinematik ist die Anzahl der Gelenke und deren Lage zueinander. Es ist abzusichern, dass für das vorgesehene Mehrkörpersystem die inverse Kinematik, eventuell mit signifikanter Verringerung der Beweglichkeit oder durch Einführung von Zwangsbedingungen zur Vermeidung/Einschränkung von Redundanzen, erstellt werden kann. Solche Zwangsbedingungen, die einen eindeutigen Bewegungszusammenhang zwischen zwei Freiheitsgraden festlegen, existieren in gewissem Rahmen auch bei menschlichen Bewegungen und verleihen diesen zum Teil ihr typisches Aussehen.

Im Folgenden werden die mathematischen Grundlagen der Roboterkinematik, wie sie in dieser Arbeit Verwendung finden, erläutert. Die Beschreibung der Kinematik gliedert sich in zwei Problemstellungen, die in Abbildung 6.2-13 dargestellt sind.

Mithilfe der direkten Kinematik soll, bei gegebenen Gelenkwinkeln $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)^T$, wobei n die Anzahl der Freiheitsgrade ist, und gegebenen Gelenkparametern die Position und die Orientierung des Endeffektors in Bezug auf das Ausgangskoordina-tensystem berechnet werden. Mithilfe der inversen Kinematik soll der Gelenkwinkel-vektor Θ bestimmt werden, mit dem eine gegebene Position bei gegebenen Gelenkparametern angefahren werden kann. Existiert eine Lösung, so ist die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten von Interesse.

Abbildung 6.2-13: Direktes und inverses kinematisches Problem¹⁰⁴

Die Position und die Orientierung des Endeffektors eines Manipulators kann aus der Stellung der Gelenke durch die direkte kinematische Beziehung berechnet werden, welche eine Abbildung des Konfigurationsraumes C auf den kartesischen Aufgabenraum W (*Work space*) darstellt:

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\Theta); \mathbf{x} \in W \subset \mathbb{R}^m; \Theta \in C \subset \mathbb{R}^n \quad \text{Formel 6.2-1}$$

Dabei ist \mathbf{f} eine im Allgemeinen nichtlineare, differenzierbare Funktion, die den n -dimensionalen Gelenkwinkelvektor Θ auf den m -dimensionalen verallgemeinerten Positionsvektor \mathbf{x} (auch Aufgabenvektor genannt), der sowohl die Position als auch die Orientierung enthält, abbildet. Die Abbildung des Gelenkwinkelraumes in den Aufgabenraum wird mithilfe von Koordinatentransformationen beschrieben. Eine der am häufigsten eingesetzten Beschreibungsformen erfolgt nach der Denavit-Hartenberg-Notation¹⁰⁵. Damit lassen sich die Beziehungen von zwei aufeinander folgenden translatorischen oder rotatorischen Gelenken durch eine homogene (4x4)-Transformationsmatrix mathematisch beschreiben. Diese homogene Transformationsmatrix stellt das Koordinatensystem eines Gelenkes in Bezug auf das Koordinatensystem des vorhergehenden Gelenks dar. Durch die Multiplikation der Transformationsmatrizen aller Gelenke wird die Kinematik des Roboterarms, und somit die Lage des Endeffektors bezüglich des Basiskoordinatensystems, eindeutig beschrieben.

Das Problem der Steuerung eines Manipulators besteht darin, bei gegebener Trajektorie $\mathbf{x}(t)$ im m -dimensionalen Aufgabenraum eine Trajektorie im n -dimensionalen Gelenkwinkelraum $\Theta(t)$ derart zu berechnen, dass $\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(\Theta(t))$ erfüllt ist. Mithilfe der inversen kinematischen Transformation werden die zugehörigen Gelenkwinkel Θ aus der verallgemeinerten Position \mathbf{x} ermittelt, die durch die Regelung weiterverarbeitet werden:

¹⁰⁴ Dillmann 1991

¹⁰⁵ Denavit 1955

$$\Theta = f^{-1}(\mathbf{x}); \quad \mathbf{x} \in W \subset \mathbb{R}^m; \quad \Theta \in C \subset \mathbb{R}^n \quad \text{Formel 6.2-2}$$

Der Arm des Roboters, dessen Kinematik im vorhergehenden Kapitel hergeleitet wurde, ist mit einem Freiheitsgrad redundant. Redundante Manipulatoren besitzen mehr kinematische Freiheitsgrade, als für die Positionierung und Orientierung im Raum mindestens notwendig sind. Eine vorgegebene Trajektorie des Endeffektors (TCP) im kartesischen Raum, kann durch unendliche viele Gelenkwinkeltrajektorien abgefahren werden. In der Literatur wurden zahlreiche Vorschläge gemacht, um eine bestimmte Trajektorie aus der Menge aller möglichen Gelenkwinkeltrajektorien für die Steuerung auszuwählen. Dies erfolgt durch die Formulierung von zusätzlichen Anforderungen für die jeweilige Aufgabenstellung, wie das Umgehen von Hindernissen, die Vorgabe von Gelenkstellungen, die Minimierung des Energieverbrauchs, die Einhaltung von Grenzwerten, die Verbesserung des Geschwindigkeitsverhaltens des TCP und die Vermeidung von Singularitäten. Die Lösung des Problems wird auf ein vektorielles Optimierungsproblem zurückgeführt, in das derartige Anforderungen als Zielfunktionen einfließen.

Das Problem der inversen Kinematik (IK-Problem) besteht darin, aus einer verallgemeinerten kartesischen Position des Endeffektors den zugehörigen Gelenkwinkelvektor zu berechnen. Im Gegensatz zum Problem der direkten Kinematik, kann für das Problem der inversen Kinematik nicht immer eine eindeutige Lösung ermittelt werden. Dies hängt mit den Mehrdeutigkeiten der trigonometrischen Funktionen zusammen, die bei den kinematischen Transformationen auftreten.

Bei der Berechnung des Gelenkwinkelvektors aus dem kartesischen Positionsvektor können die folgenden Fälle unterschieden werden:

- Das IK-Problem ist nicht lösbar. Dies ist der Fall, wenn Trajektorienteile außerhalb des Arbeitsraumes des Manipulators liegen. Ursache hierfür sind entweder die kinematische Struktur des Manipulators oder die Gelenkanschläge.
- Das IK-Problem ist eindeutig lösbar bzw. es existiert eine endliche Menge von Lösungen. Dies ist der Fall bei kinematisch nicht redundanten Systemen ($n \leq m$), bei denen zumindest lokal immer eine eindeutige Lösung ermittelt werden kann.
- Für das Problem existiert eine unendliche Menge von Lösungen. Dieser Fall tritt in der Regel bei kinematisch redundanten Systemen ($n > m$) auf, d. h. es existiert keine eindeutige Lösung für das IK-Problem. Für diese Systeme gibt es in der Regel unendlich viele Gelenkwinkelkombinationen, mit denen der Endeffektor eine bestimmte Position und Orientierung im Arbeitsraum halten kann.

Die Methoden zur Lösung des inversen kinematischen Problems lassen sich in zwei Klassen einteilen:

Analytische Methoden: Sie liefern eine Lösung als explizite mathematische Formel. Dabei wird versucht, die direkte kinematische Beziehung symbolisch nach den

einzelnen Gelenkwinkeln aufzulösen¹⁰⁶. Für eine gegebene Zielstellung \mathbf{x} lässt sich durch diese Methoden sehr schnell ein Gelenkvektor Θ berechnen. Außerdem gestatten die Methoden das Auffinden aller möglichen Lösungen. Im Allgemeinen können nur Spezialfälle analytisch gelöst werden. Voraussetzungen hierfür sind spezielle Achsenanordnungen wie mehrere parallel verlaufende bzw. sich in einem Winkel von 90 Grad schneidende Achsen¹⁰⁷. Diese Voraussetzungen werden von den meisten Industrierobotern eingehalten. Für sie existieren damit auch geschlossene Lösungen, die für die effiziente Steuerung der Bewegungen unabdingbar sind. Alle Systeme mit höchstens sechs Rotations- oder Translationsgelenken, die in einer offenen kinematischen Kette angeordnet sind, können analytisch gelöst werden¹⁰⁸. Bei kinematisch nicht-redundanten Roboterarmen ist dies eine gängige Vorgehensweise. Im Gegensatz dazu kann bei kinematisch redundanten Roboterarmen eine Lösung nicht mehr in mathematisch geschlossener, expliziter Form angegeben werden. Den oben genannten Vorteilen analytischer Verfahren steht der große Nachteil gegenüber, dass für jede Roboterkinematik ein eigener Lösungsansatz erforderlich ist, der sich nicht auf andere Roboterkinematiken übertragen lässt.

Numerische Methoden: Sie versuchen, ausgehend von einem gegebenen Startgelenkvektor Θ_0 , neue Gelenkvektoren so zu bestimmen, dass die Zielstellung des Endeffektors im Arbeitsraum nach einigen Iterationen erreicht wird. Diese Methoden basieren letztendlich darauf, dass die direkte kinematische Beziehung linearisiert wird und man so die umfangreichen, mathematischen Werkzeuge der linearen Algebra zur Lösung des Problems heranziehen kann. Eine gute Übersicht dieser Verfahren beschreibt Nakamura¹⁰⁹. Der Vorteil dieser Verfahren liegt in ihrer Anwendbarkeit auf jede beliebige Roboterkinematik, für welche die direkte kinematische Beziehung bekannt ist. Der entscheidende Nachteil ist der lokale Charakter dieser Verfahren. Durch die Linearisierung entstehen Fehler, durch die oft keine Konvergenz garantiert werden kann.

Bei kinematisch redundanten Systemen ist man in der Regel auf numerische Verfahren angewiesen, die sehr rechenaufwendig sind und in den meisten Fällen für Echtzeitanforderungen nicht genutzt werden können. Dabei wird die Lösung des IK-Problems auf die Formulierung einer Optimierungsaufgabe mit einer expliziten Aufstellung von Nebenbedingungen zurückgeführt.

¹⁰⁶ Woernle 1987 ; Hiller / Woernle 1986

¹⁰⁷ Featherstone 1983

¹⁰⁸ Craig 2005

¹⁰⁹ Nakamura 1991

Die inverse Kinematik des Roboterarms aus Kapitel 6.2 ist mithilfe von Zwangsbedingungen, die zwischen den Bewegungen der Schulter- und der Ellbogengelenke bestehen, bestimmbar.

6.3 Regelungskonzept und Anforderungen an die Funktionseinheiten

6.3.1 Regelungskonzept

In dieser Arbeit wird auf die Regelung des Mehrkörpersystems des humanoiden Roboters nicht eingegangen. Allerdings muss das mechatronische System des Roboters die Anforderungen erfüllen, die für den gewünschten Betrieb notwendig sind. Daher gehen die Bedingungen für die Regelung des Systems als Anforderungen in das Zielsystem mit ein.

In Abbildung 6.3-1 ist ein Regelkreis dargestellt, wie er in jeder Gelenkeinheit vorhanden ist.

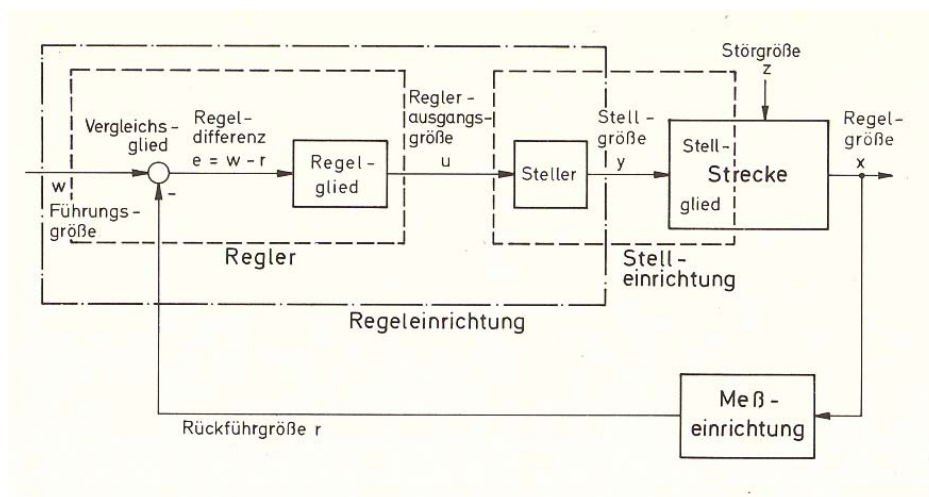


Abbildung 6.3-1: Blockschema einer Regelung¹¹⁰

Bei dem Regler handelt es sich um den Gelenkrechner, in dem eine Leistungseinheit integriert ist, mit der entsprechenden Software. Bei der Stelleinrichtung handelt es sich um den Aktor und den Antriebsstrang, die beide in ihrem Verhalten nicht zu trennen sind und daher der Strecke zugeordnet werden. Bei den Störgrößen handelt es sich vor allem um solche, die durch ein statistisches, nicht vorhersehbares Verhalten der Strecke, wie z.B. durch Spiel und veränderliche Reibung, Einfluss nehmen, und solchen, die aufgrund einer Überlagerung durch andere Aktionen des Mehrkörpersystems entstehen, wie z.B. durch die Übertragung von Schwingungen im System. In

¹¹⁰ Föllinger 1994 - S.4

Abbildung 6.3-2 sind die Regelkreise dargestellt, die in jeder Gelenkeinheit des humanoiden Roboters vorzusehen sind.

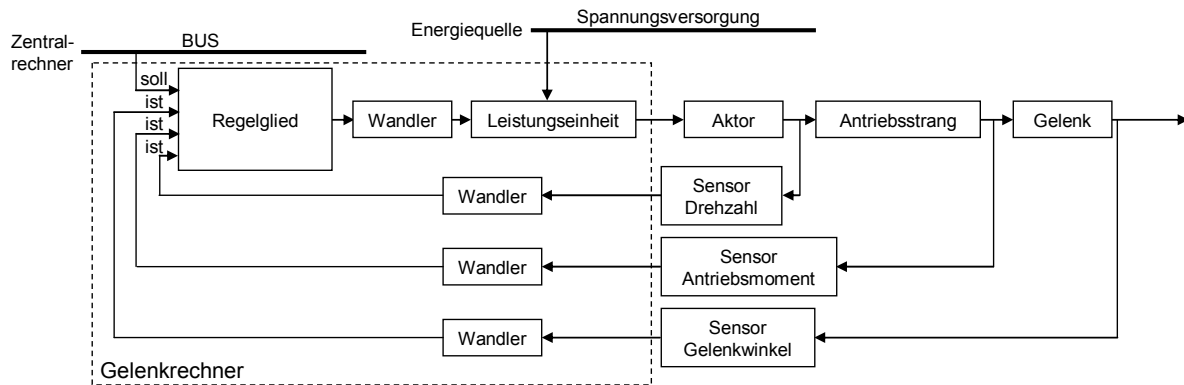


Abbildung 6.3-2: Regelkreise, die in jeder Gelenkeinheit zu integrieren sind

6.3.1.1 Dynamikmodell

Frühzeitig in der Entwicklung sind die Antriebsmomente abzuschätzen, die für den Betrieb des Mehrkörpersystems notwendig sind.

Zum jetzigen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess besteht das Mehrkörpersystem aus sieben angeordneten Drehgelenken. Aus Erfahrungswissen ist es möglich, den Komponenten im Mehrkörpersystem eine Dichte und ein Volumen zuzuweisen (Abbildung 6.3-3).

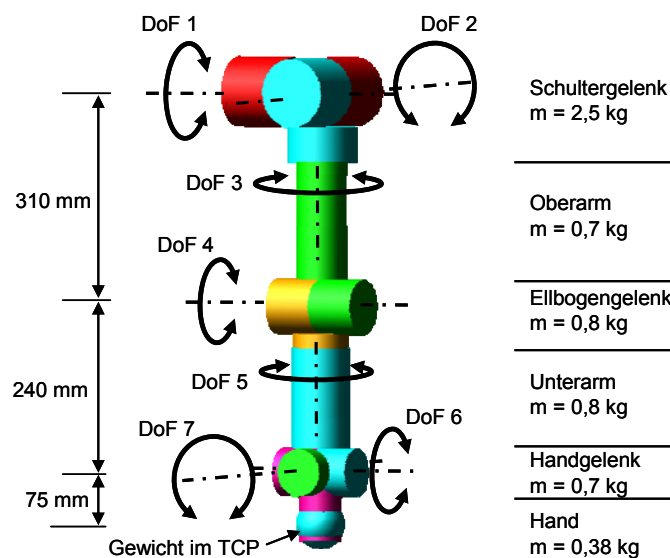


Abbildung 6.3-3: Modell des Arms für eine Bestimmung der Antriebsmomente (erstellt mit der Software ADAMS)

Die Körperabmessungen der Arme orientieren sich an dem durchschnittlichen Abstand zwischen den Drehachsen der Gelenke des Menschen, in Abhängigkeit von der

Körpergröße¹¹¹. Hiernach ist die Drehachse des Ellbogens einer 50 perzentilen Frau 31 cm von der Schulter und der Drehpunkt des Handgelenks 24 cm vom Ellbogen entfernt¹¹². Zusammen mit den grundlegenden dynamischen Anforderungen an die Bewegungen lassen sich so in einer Simulation grobe Anhaltswerte für die in den Antrieben auftretenden Momente bestimmen. Diese Angaben sind eine primäre Anforderungen an die Aktorik in der Konzeptphase.

Diese Simulation stellt einen Prozess dar, der während der gesamten Entwicklung fortzusetzen ist, indem die Daten des Systems immer dem aktuellen Entwicklungsstand anzupassen sind. Am Schluss beschreibt das Modell das reale Verhalten des Arms. Bei den hier durchgeführten Simulationen werden zwei Belastungsfälle unterschieden. Der eine ist, dass der Roboter eine Masse von 3 kg statisch in der ausgestreckten Hand hält, und im anderen bewegt der Roboter einzelne Gelenke und hält dabei eine Masse von 1 kg in der Hand. Die Ergebnisse aus diesen Simulationen sind in Tabelle 6.3-1 dargestellt.

		Bewegte Gelenke, mit 1 kg im TCP							Statisch 3 kg im TCP gehalten (jeweils maximales Moment)
		1	2	3	4	5	6	7	
Zeit [s]		1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	
Gelenkwinkel		90°	90°	90°	60°	90°	30°	60°	
Moment in den Gelenken [Nm]	1	27,48	0	8,37	10,05	1,04	0	0	31,89
	2	0	27,45	14,42	0	7,13	7,21	7,52	31,89
	3	0	0	8,37	0	0,70	0	0	13,07
	4	10,79	0	0	10,80	7,13	7,21	7,52	13,07
	5	0	0	0	0	0,87	0	0,11	2,07
	6	1,39	0	0	1,56	0,55	1,01	0	2,39
	7	0	1,38	1,16	0	0,46	0	1,08	2,39

Tabelle 6.3-1: Maximale Antriebsmomente in einer ersten Simulation des Mehrkörpersystems. Bewegung anhand einer Sinusfunktion, von Stillstand zu Stillstand.

Die Bewegungsgeschwindigkeit ändert sich anhand einer Sinusfunktion zwischen der zum jeweiligen Gelenk horizontalen und der nach oben gerichteten vertikalen Position, oder dem oberen Endanschlag des Gelenks. Eine trigonometrische Funktion wurde hierfür gewählt, da dies zu ruckfreien Bewegungen führt und die Funktion differenzierbar ist. Die drei Gelenke in der Schulter führen diese Bewegung vom Stillstand zum Stillstand in einer Sekunde und die vier Gelenke im Ellbogen und im Handgelenk in einer halben Sekunde durch. Die anderen Gelenke sind bei den Bewegungen immer

¹¹¹ Jürgens et al. 1989

¹¹² Roebuck et al. 1975

statisch so ausgerichtet, dass dies eine maximale Belastung des bewegten Gelenks zur Folge hat.

6.3.2 Anforderungen an die Aktorik

Eingangsgröße der Aktorik ist die Hilfsenergie, die für den Betrieb des Roboters zur Verfügung steht und die anhand der jeweiligen Sollgröße moduliert ist. Für den hier zu entwickelnden Roboter wird elektrische Energie als Hilfsenergie eingesetzt, die in Batterien in der Plattform gespeichert wird. Von den Aktoren wird zum einem gefordert, dass sie eine hohe Leistungsdichte besitzen und problemlos in eine Regelstrecke zu integrieren sind, und zum anderen, dass sie ein hohes Antriebsmoment beim Anfahren aus dem Stillstand aufbringen, was für das manuelle Manövrieren von schweren Gegenständen benötigt wird. Aus diesen Gründen wurde von vornherein für dieses Projekt entschieden, Servomotoren einzusetzen. Die Kommutierung der Motoren erfolgt über Bürsten, da bürstenlose Motoren, die bei gleicher Baugröße leistungsstärker sind, eine größere Elektronikeinheit für die berührungsfreie Kommutierung benötigen, wofür im Körper des Roboters nicht genügend Platz zur Verfügung steht.

Ebenso wurde von vornherein entschieden, das Mehrkörpersystem des Arms aufgrund des Erscheinungsbilds mit separaten Gelenkantrieben anzutreiben. Ein führender Antrieb benötigt eine zusätzliche Mechanik, die außerhalb der Mechanik des Roboterarms angebracht ist (Kapitel 5.3.2). Je größer die Antriebsmomente sind, umso größer ist die Mechanik des führenden Antriebs, was das optische Erscheinungsbild des Arms stark beeinträchtigen würde.

Um die Drehmassen des Arms klein zu halten, ist die massereiche Aktorik so nahe wie möglich an der Basis des Mehrkörpersystems anzubringen oder gar in diese auszulagern. Diese Forderung führt in einer seriellen Kinematik dazu, dass die Antriebsleistung eventuell über die Drehachsen hinweg zu übertragen ist, die sich zwischen dem Aktor und dem anzutreibenden Gelenk befinden. Für den Aktor eines Gelenks in einer seriellen Kinematik bestehen die prinzipiellen Möglichkeiten, vor oder nach dem Gelenk angebracht zu werden. Um die Antriebsleistung zu verringern, wird von allen Antrieben im Arm gefordert, dass sie an einer Komponente der Tragstruktur angebracht werden, die nicht vom Aktor selbst bewegt wird. Die Reihenfolge für die Entwicklung der Gelenkkomplexe ist mit dieser Forderung konform, da die Entwicklung des Arms (Kapitel 4.2) seriell von dem am weitesten von der Basis entfernten Gelenkkomplex bis hinunter zur Basis durchgeführt wird. Somit ist es möglich, die Aktorik der untergeordneten Gelenkeinheiten bei dem Entwurf der Übergeordneten mit zu betrachten. Von der Unterbringung eines Aktors im Inneren eines untergeordneten Gelenkkomplexes ist abzusehen, da der dortige Bauraum für die Komponenten des Gelenkkomplexes zur Verfügung steht. Ein Beispiel hierfür ist der Ellbogenantrieb, der

nicht im Schultergelenk untergebracht werden kann, da sich dort die Antriebseinheiten der Schulter befinden. Dies macht es notwendig, den Antriebsstrang durch einen Gelenkkomplex hindurch oder an ihm vorbei zu dem Aktor zu leiten. Dieser ist an einer Tragstruktur angebracht, die zwei Gelenkkomplexe verbindet, oder ist in den Torso ausgelagert. Während der Konzeption des Standortes des Aktors ist in einer konzeptionellen Verifikation abzuklären, dass die Antriebsleitung vom Motor über einen Antriebsstrang zu dem Gelenk übertragen werden kann. Weiterhin ist ein Anbringen der Aktoren auf der Außenseite der Gelenkkomplexe zu vermeiden, da dies dazu führt, dass der Aktor bei einer Gelenkbewegung störend aus dem Arm heraustritt. Ein Beispiel hierfür ist ein Pitch-Yaw-Gelenk, bei dem der Antrieb von DoF 2 außerhalb des Gelenks auf der mittleren Tragstruktur des Gelenks, dem Segment 2, befestigt ist und bei einer Bewegung von DoF 1 außerhalb des Gelenks bewegt wird (Abbildung 6.3-4).

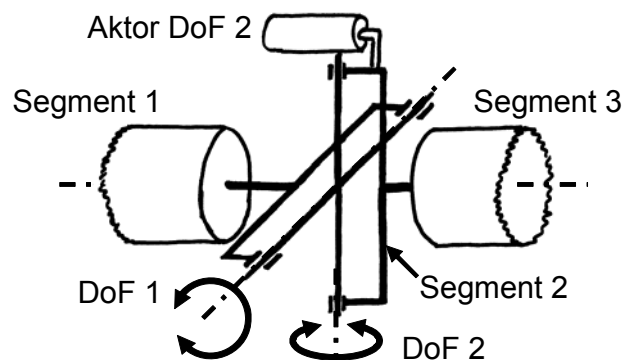


Abbildung 6.3-4: Beispiel für einen Aktor, der bei einer Bewegung des Gelenks 1 aus dem Körper heraustritt.

Der Antriebsstrang muss die Antriebsleistung ohne Störungen übertragen und darf in keiner Situation zum Stick-Slip-Effekt neigen. Um dies zu gewährleisten, wird von allen Systemelementen des Antriebsstrangs gefordert, dass sie nicht selbsthemmend sind (Kapitel 5.3.3.2).

Der Antrieb soll möglichst keine Kopplung zu anderen Gelenken aufweisen. D.h. die Systemelemente des Antriebsstrangs, die ein Gelenk überbrücken, sollen von diesem unabhängig sein.

Bei dem Einsatz von fluidischen Systemelementen des Antriebsstrangs im Arm sind hydraulische den pneumatischen vorzuziehen. Aufgrund der hohen Kompressibilität von Gasen stellen diese ein mit niedriger Frequenz schwingungsfähiges System dar und weisen ein hohes Sicherheitsrisiko im Falle einer Undichtigkeit auf.

Im Antriebsstrang ist nach Möglichkeit das übertragene Moment zu messen, und am Gelenk ist neben dem Antrieb ausreichend Bauraum für die Winkelmessung vorzusehen (Kapitel 5.4).

6.3.3 Anforderungen an die Sensorik

An jedem Einzelgelenk im Arm des Roboters sind Sensoren zur Bestimmung der Antriebsgeschwindigkeit, des Gelenkwinkels und des antreibenden Moments anzubringen.

Die Antriebsgeschwindigkeit wird mit Encodern an den Servomotoren aufgenommen, die dort vom Hersteller angebracht werden. Diese Encoder übermitteln, je nach Auflösung, eine bestimmte Anzahl von Impulsen pro Umdrehung der Motorwelle. Genutzt werden in den Encodern in der Regel optische oder magnetoresistive Verfahren. Die Verfahrensgeschwindigkeit ergibt sich durch einen Bezug der Anzahl der Impulse auf die benötigte Zeit. Eine Geschwindigkeitsmessung am Antrieb ist exakter als mit einem Sensor direkt am Gelenk, da sich zwischen dem Aktor und dem Gelenk eine Übersetzung ins Langsame befindet. Eine Bestimmung des Gelenkwinkels ist mit diesen Sensoren auch möglich, bedarf aber einer Initialisierung des Sensors zu Beginn der Messung und führt dazu, dass Spiel und Dehnungen im Antriebsstrang als Fehler in die Messung mit eingehen.

An die Auflösung und Wiederholbarkeit der Winkelsensoren werden im humanoiden Roboter geringere Anforderungen gestellt, als dies z.B. bei Industrierobotern der Fall ist. Eine Ausrichtung des Greifpunktes der Hand um ± 1 mm im Raum ist für Tätigkeiten in der Küche ausreichend. Gelenkwinkelmessungen in den Armgelenken müssen in der Schulter, aufgrund des Hebelarms, die genauesten Ergebnisse liefern. Zur Vermeidung einer Initialisierung bei jedem Neustart sind absolute Drehwinkelsensoren an den Gelenken vorzusehen. Am Forschungszentrum Informatik der Universität Karlsruhe (TH) wurden berührungsfreie Winkel- und Linearsensoren entwickelt, die sehr flexibel an die Umgebung angepasst werden können und wenig Bauraum benötigen. In diesen Sensoren tasten zwei nebeneinander angebrachte optische Sensoren (HEDR-8100 Series) der Firma Agilent¹¹³ zwei Codespuren ab. Bei dem einen handelt es sich um einen inkrementellen Code mit hoher Auflösung und bei dem anderen um einen absoluten, mit geringer Auflösung. Diese Sensoren, die hier als quasiabsolute Sensoren bezeichnet werden, verfeinern die absolute Messung durch die inkrementelle. Die Codespur ist auf einer Folie aufgebracht, die als Streifen oder als Scheibe aufgebaut ist (Abbildung 6.3-5). Der Sensorhauptteil überdeckt nur einen kleinen Bereich der Codefolie und kann mit einer individuellen Haltevorrichtung an einer Wirkfläche angebracht werden. Dies hat zur Folge, dass nach geringfügigen Anpassungen an alle in Tabelle 5.4-2 und Tabelle 5.4-3 dargestellten Wirkflächenpaarungen solch ein Sensor angebracht werden kann. Beschränkendes Kriterium für die

¹¹³ Agilent 2006

Integration dieser Sensoren ist der minimale Abstand zwischen den einzelnen Strickmarken auf der Codespur, was aufgrund der geforderten Auflösung zu einer mindestens zu überstreichenden Codelänge pro verfahrenen Gelenkwinkel führt. Bei den Drehwinkelsensoren führt dies zu einem Minstdurchmesser der inkrementellen Codespur.

Sensorbauformen	Längenmessung Lage der Wirkflächen zur Bewegungsrichtung	Winkelmessung Lage der Wirkflächen zur Drehachse
<p>Aufnehmer (Sensorhauptteil) freier Raum (Sensorverbindungsteil)</p> <p>Codestreifen (Sensorebenteil) Bewegungsrichtung</p>		<p>beide parallel zur Drehachse</p> <p>mit oder ohne Durchgang</p>
<p>Aufnehmer (Sensorhauptteil) freier Raum (Sensorverbindungsteil)</p> <p>Bewegungsrichtung Codescheibe (Sensorebenteil)</p>		<p>beide senkrecht zur Drehachse</p> <p>Mit oder ohne Durchgang</p>

Abbildung 6.3-5: Bauformen der quasiabsoluten Sensoren für Längen- bzw. für Drehwinkelmessungen

Solche Sensoren sind nach Möglichkeit an allen Gelenken des Arms anzubringen. Dies hat den Vorteil, dass alle Gelenke die gleiche Art von Gelenkwinkelsignal an das Regelungssystem senden, und dass die Sensoren, die nur ein geringes Eigengewicht aufweisen, den Umgebungsbedingungen gut angepasst werden können. Wenn an dem Gelenk für die Montage des Sensors eine Wirkfläche fehlt, ist zu überprüfen, ob hierfür ein zusätzliches Wirkflächenpaar eingebracht werden kann. Da der Sensor berührungsfrei arbeitet, müssen von den Wirkflächen nur die Haltekräfte aufgenommen werden.

Die Messung des Antriebsmoments ist antriebsseitig im Antriebsstrang durchzuführen. Der Aufnehmer ist so nahe wie möglich am anzutreibenden Gelenk anzubringen, um Störquellen zwischen dem Sensor und dem Gelenk zu vermeiden. Ein Beispiel ist der Antrieb eines Gelenks über einen Seilzug, in dem zwischen dem Gelenk und der Zugkraftmessung der Seilzug durch einen gekrümmten Bowdenzug geführt wird. Die Reibkraft im Bowdenzug ist proportional zu einer Exponentialfunktion des Umschlingungswinkels und geht als schwer zu korrigierender, großer Fehler in die Messung ein.

6.4 Rechnerhardware

Die Struktur der Rechnerarchitektur und deren physikalischer Aufbau ist nicht Gegenstand der hier beschriebenen Entwicklung. Allerdings sind die Voraussetzungen

für deren Integration im Gesamtsystem bereitzustellen und werden daher als Randbedingungen bei dem Entwurf der Teilsysteme berücksichtigt. Hierfür ist ein grundlegendes Wissen über die Verteilung der Rechnerhardware im System und über die Bedingungen für den Datenaustausch zwischen den Komponenten notwendig.

Die im humanoiden Roboter eingesetzte Rechnerarchitektur ist in Abbildung 6.4-1 dargestellt¹¹⁴.

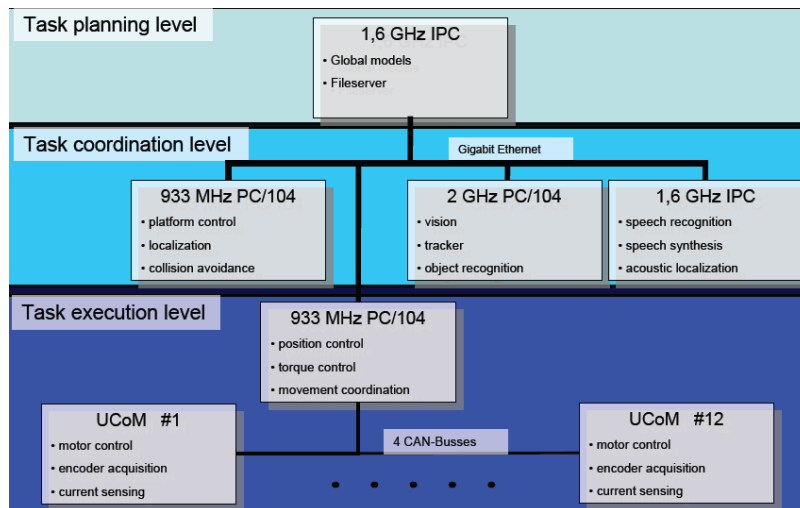


Abbildung 6.4-1: Rechnerarchitektur im System des humanoiden Roboters¹¹⁵

Für die Bewegungsplanung des Gesamtsystems ist im Körper des Roboters eine zentrale Rechereinheit untergebracht. Diese besteht aus einem Teil, in dem die Handlungen geplant werden, und aus einem weiteren für deren Koordination. Diese Einheiten werden im Weiteren unter dem Begriff Zentralrechner zusammengefasst. In einem weiteren Teil, der die mechanischen Handlungen anordnet, steht ein PC über einen CAN-Bus (Controller Area Network) mit den Gelenkrechnern in Verbindung¹¹⁵. Bei den Gelenkrechnern handelt es sich um UCoMs (Universal Controller Module) und einer aufgesetzten Leistungseinheit. In den UCoMs befindet sich ein DSP-Prozessor (Digital Signal Processor) der Firma Motorola. Die Funktion der AD/DA-Wandler, über welche der Gelenkrechner mit anderen elektrischen Einheiten kommuniziert, ist in den UCoMs integriert. Auf der Platine des UCoMs ist eine weitere Platine mit der Leistungseinheit angebracht, die drei Aktoren parallel ansteuern kann¹¹⁵. In einem UCoM, mit dem drei Gelenke unabhängig voneinander geregelt werden können, sind drei Gelenkrechner in einer Rechereinheit zusammengefasst.

Die UCoMs und deren Leistungseinheit benötigen einen Bauraum von 80 mm Länge, 70 mm Breite und 26,5 mm Höhe und wiegen 59 g (Abbildung 6.4-2).

¹¹⁴ Ly et al. 2004

¹¹⁵ Regenstein et al. 2007

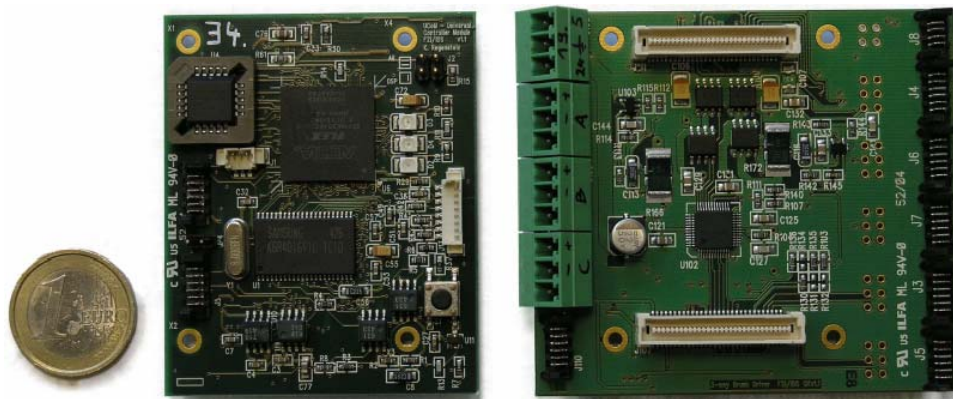


Abbildung 6.4-2: Leistungseinheit und UCoM des Gelenkrechners¹¹⁶

Die Gelenkrechner sollen nahe bei den Komponenten des Regelkreises angebracht werden, um eine Störung der Signale, die von langen Kabeln hervorgerufen werden, zu vermeiden.

6.4.1.1 Verkabelung

Die elektronischen Systemelemente, mit denen die in Abbildung 6.3-2 dargestellten Regelkreise ermöglicht werden, sind mit dem ihnen zugeordneten Gelenkrechner verbunden. Dies beinhaltet den Austausch von Informationen und von Energie. In Abbildung 6.4-3 ist die sich daraus ergebende Verkabelung schematisch gruppiert dargestellt. Jeder Sensor wird standardmäßig mit einer Signal- und einer Energieleitung verbunden, auch wenn diese bei manchen realen Systemelementen zusammenfallen. Bei diesen Anschlüssen handelt es sich um drei- bis sechsadrige Kabel.

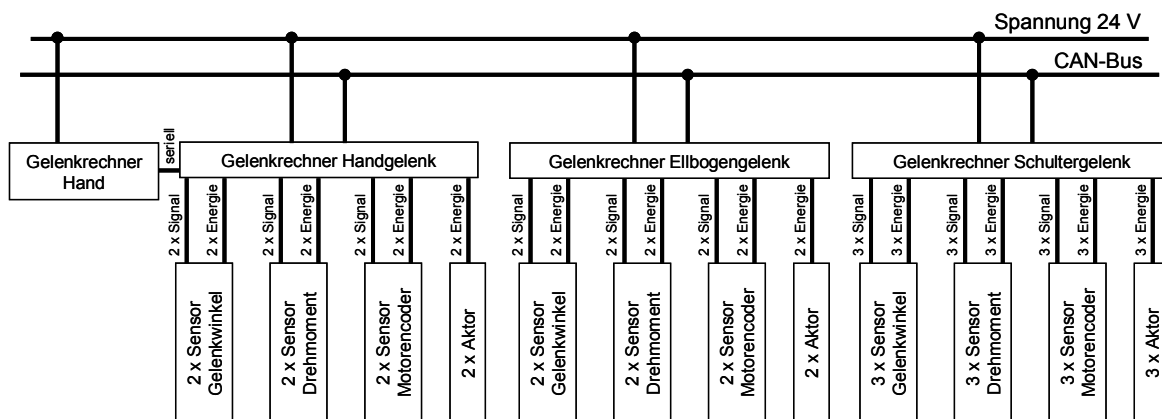


Abbildung 6.4-3: Verkabelung zwischen den elektronischen Systemelementen im Arm des Roboters

¹¹⁶ Asfour et al. 2006b

6.5 Objektorientierte Modelle für den Entwurf des Arms

Klassendiagramme, die ihren Ursprung in der Softwareentwicklung haben, ermöglichen die Modellierung von komplexen Systemen auf unterschiedlichem Abstraktions- und Auflösungslevel (Kapitel 2.2.3). In diesen Diagrammen lassen sich Beziehungen darstellen, die zwischen den Klassen bestehen, womit sich komplexe Systeme beschreiben lassen und deren Funktionalitäten abgesichert werden können. Eine Klasse ist die Definition der Attribute, Operationen und der Semantik für eine Menge von Objekten. Alle Objekte einer Klasse entsprechen dieser Definition¹¹⁷. In Klassen lassen sich Objekte, bei denen es sich hier um die Systemelemente handelt, anhand von spezifischen Eigenschaften oder Funktionen ordnen, die bezüglich einer Integration ausschlaggebend sind. Diese Klassen ergeben sich aus der Morphologie der Systemelemente. Als Vorarbeit für eine Entwicklung ist für die Systemelemente, die in das System zu integrieren sind, der Stand der Technik in Klassifikationen abzubilden. Mithilfe dieser Klassendiagramme lassen sich Klassen bestimmen, die in ihrer Kombination die Anforderungen erfüllen. In diesen Diagrammen, die mit unterschiedlicher Auflösung darstellbar sind, sind die Objekte bzw. Systemelemente zu erkennen, die zueinander über kompatible Wirkflächen verfügen. In den objektorientierten Diagrammen sind keine geometrischen Eigenschaften der Objekte enthalten. Dies kann damit gelöst werden, dass eine Beschreibung der Eigenschaften, welche die Wirkflächen des Objekts aufweisen, den Objekten mithilfe des Elementmodells hinterlegt werden. Da diese Eigenschaften für eine Integration der Objekte ausschlaggebend sind, ist es sinnvoll, die Objekte danach zu klassieren (Kapitel 5).

Im Folgenden wird die interne Struktur der Funktionseinheiten, so wie sie im humanoiden Roboter eingesetzt werden, in Klassendiagrammen beschrieben. In Abbildung 6.5-1 bezieht sich das Klassendiagramm auf die Struktur der drei Gelenkkomplexe im Arm des Roboters.

¹¹⁷ Oestereich 2001 - S.209

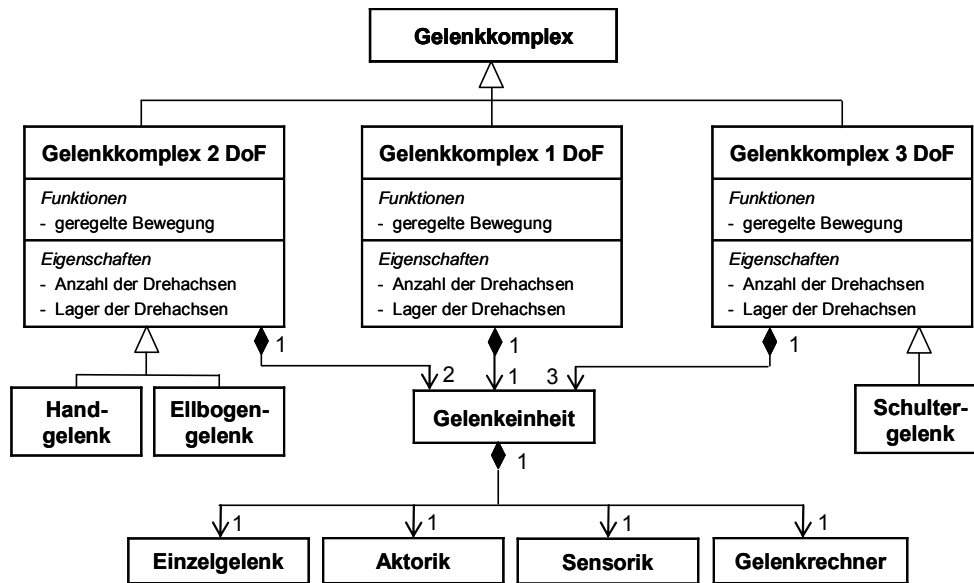


Abbildung 6.5-1: Klassendiagramm Gelenkkomplex

Ein Einzelgelenk besteht aus zwei Komponenten der Tragstruktur, die über eine Drehachse gelenkig miteinander verbunden sind. Für Einzelgelenke, wie sie im Arm genutzt werden, stehen ein nicht fluchtendes und ein fluchtendes Gelenk zur Verfügung. (Abbildung 6.5-2)

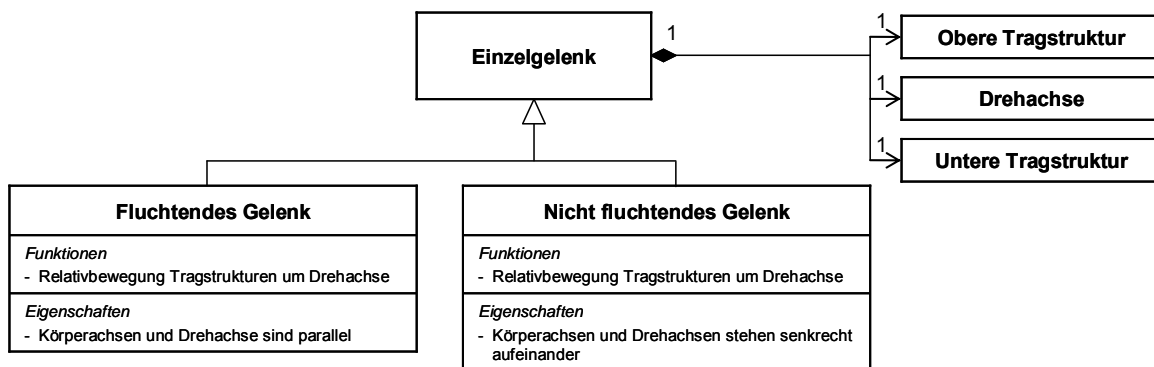


Abbildung 6.5-2: Klassendiagramm Einzelgelenk

Die Aktorik besteht aus einem Energiesteller, der hier als Aktor bezeichnet wird und die ihm zugeführte primäre Energie in eine mechanische Energie wandelt, und einem Antriebsstrang, der die Antriebsleistung zu der im Gelenk angetriebenen Tragstruktur überträgt. Der Antriebsstrang besteht aus einem oder mehreren Energiewandlern, welche die Antriebsleistung wandeln und leiten (Abbildung 6.5-3).

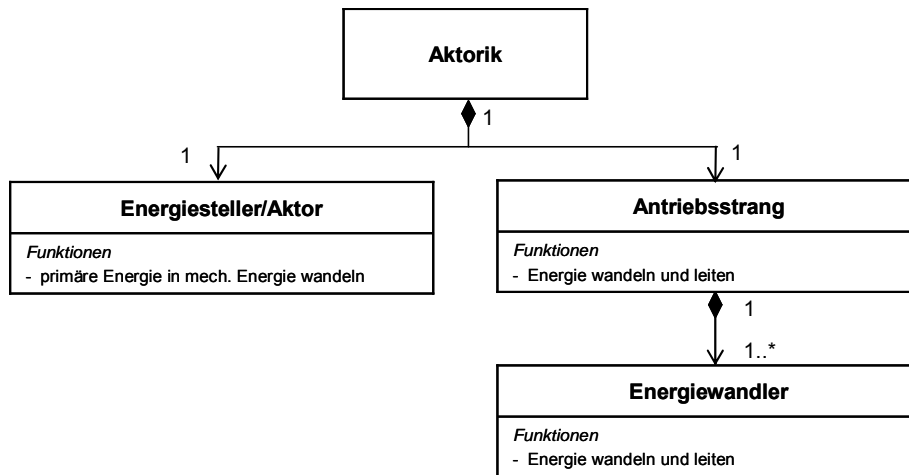


Abbildung 6.5-3: Klassendiagramm Aktorik

Bei den im Roboter genutzten Sensoren handelt es sich um Kraft-, Momenten- oder Positionssensoren. In Abbildung 6.5-4 ist dargestellt, welche Systemparameter von den jeweiligen Sensoren gemessen werden.

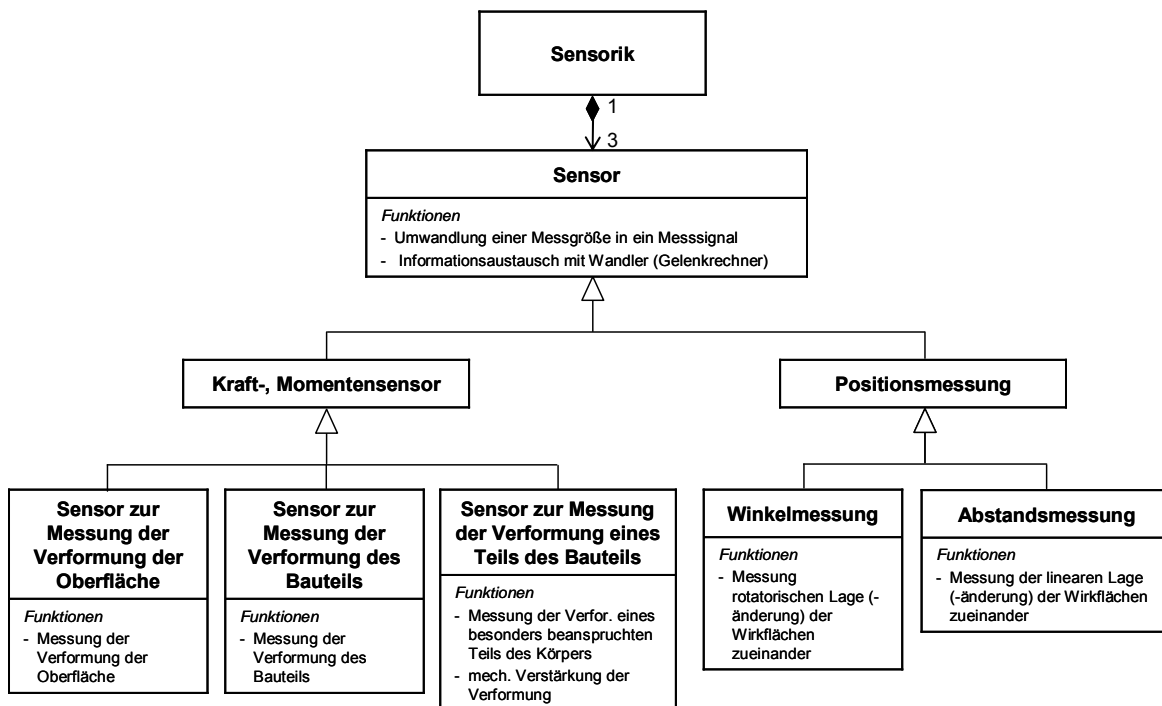


Abbildung 6.5-4: Klassendiagramm Sensorik

Zentral im Gelenkrechner, der sich in jeder Gelenkeinheit befindet, ist ein Controller, der nach bestimmten Vorgaben die Bewegungen des Gelenks regelt (Abbildung 6.5-5). Diese Vorgaben erhält der Gelenkrechner vom Zentralrechner, mit dem er mit einem Bus-System verbunden ist. Informationen erhält der Controller von den Sensoren, mit denen er über Wandler in Verbindung steht. Bei diesen Wandlern handelt es sich um AD-, DA- oder DD-Wandler. Die Fahrbefehle für den Aktor sendet der Controller an einen Wandler, der diese an eine Leistungseinheit weitergibt, die an den Aktor einen dem Fahrsignal entsprechenden Stromimpuls sendet.

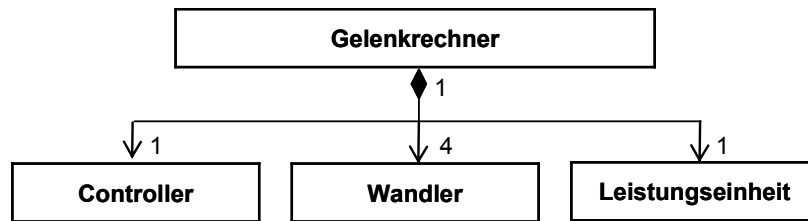


Abbildung 6.5-5: Klassendiagramm Gelenkrechner

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgt eine Konkretisierung des primären Zielsystems, in dem zu Beginn allgemeine, lösungsneutrale Anforderungen enthalten sind. Das Ergebnis ist ein konkretisiertes Zielsystem für den Arm des humanoiden Roboters, das im nächsten Abschnitt den Gelenkcomplexen und Funktionseinheiten zugeordnet werden kann. Diese Konkretisierung beinhaltet eine Bestimmung der Kinematik des Roboterarms, d.h. der Anzahl und der Anordnung der Drehachsen und der notwendigen Bewegungsgeschwindigkeiten, um die geforderten Tätigkeiten durchführen zu können. Weiterhin ergeben sich grundlegende Anforderungen an die Aktorik, die Sensorik und die Rechnerhardware, die für die Entwicklung der Gelenkcomplexe benötigt werden.

7 Systementwurf

Ziel dieses Abschnitts des Entwicklungsprozesses ist die Konzeption und der Entwurf der Gelenkkomplexe des Arms eines Humanoiden Roboters und deren Kombination zum Gesamtsystem.

7.1 Systementwurf der Teilsysteme

Im ersten Teil der Entwicklung, der Konkretisierung des Zielsystems, wurden quantitative Anforderungen an das Gesamtsystem des Roboters bestimmt (Kapitel 6). Diese Anforderungen werden nun, zu Beginn des zweiten Teils der Entwicklung, dem Systementwurf der Teilsysteme, den Gelenkkomplexen und Funktionseinheiten des Arms zugeordnet. In Tabelle 4.2-3 ist dargestellt, wie stark sich die Anforderungen auf die Funktionseinheiten der Gelenkkomplexe auswirken. Der hier genutzte Prozessabschnitt für den Systementwurf der Teilsysteme im Arms eines humanoiden Roboters (Abbildung 7.1-1) ist eine Anwendung des in Kapitel 4 hergeleiteten Prozessabschnitts für den Entwurf von Teilsystemen hochintegrierte mechatronische Systeme (Abbildung 4.3-2). Die Reihenfolge, in der die Gelenkkomplexe entwickelt werden, ergibt sich aus deren gegenseitigen Abhängigkeiten (Tabelle 4.2-2). Die Abhängigkeiten zwischen den Funktionseinheiten in den Gelenkkomplexen werden in Tabelle 4.2-4 in einer DSM dargestellt. Das Wissen über diese Abhängigkeiten ist für eine Strukturierung des Prozesses notwendig, und um mithilfe von konzeptionellen Verifikationen die Kompatibilität von noch zu Entwickelndem, zu dem Abhängigkeiten bestehen, sicherzustellen. Im hier zu entwickelnden Arm sind drei Gelenkkomplexe enthalten. Im Folgenden wird die Entwicklung von allen drei Gelenkkomplexen nach der gleichen Vorgehensweise seriell durchgeführt. Diese mehrfache Darstellung der Anwendung des Vorgehensmodells erfolgt, um dessen Wiederholbarkeit zu verifizieren und um den Aufbau des Roboterarms zu beschreiben.

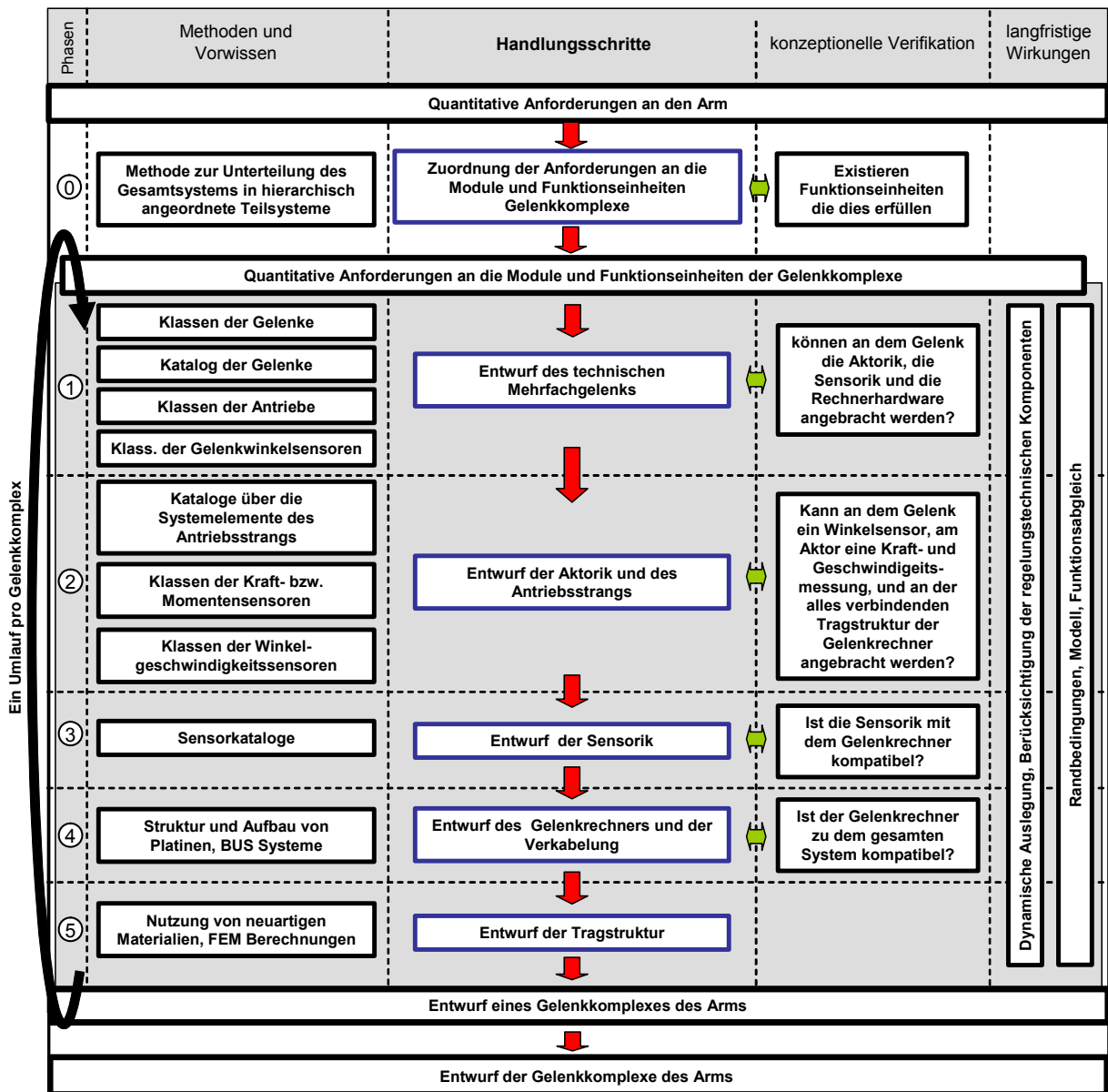


Abbildung 7.1-1: Prozessabschnitt des Systementwurfs von Gelenkkomplexen humanoider Roboter

7.2 Prozessabschnitt: Systementwurf Gelenkkomplex Handgelenk

In diesem Kapitel wird der Prozessabschnitt aus Abbildung 7.1-1 auf die Entwicklung des Gelenkkomplexes des Handgelenks angewandt.

7.2.1 Anforderungen an das Handgelenk

Im Folgenden werden die allgemeinen Anforderungen an den Arm auf die Gelenkkomplexe des Handgelenks abgebildet. Die Anforderungen an die Funktionseinheiten sind in der Reihenfolge aufgelistet, in der die Funktionseinheiten entwickelt werden (siehe Tabelle 4.2-4). Vorab sind die übergeordneten Eigenschaften aufgeführt, die beim Entwurf aller Funktionseinheiten zu beachten sind.

Übergeordnete Bedingungen

Das Handgelenk, dessen Bewegungen und die umgebenden Tragstrukturen sollen einen humanoiden Eindruck vermitteln. Die Drehmassen dieses Gelenks sollen bei Bewegungen um alle Drehachsen des Arms möglichst gering sein. Der Unterarm ist zu verkleiden und mit einer taktilen Haut zu versehen.

Bauraum

Der Schnittpunkt der Drehachsen im Handgelenk ist 240 mm von der Drehachse Ellbogen-Beugen entfernt. Dieser Bauraum kann nicht in seiner gesamten Länge für die Systemelemente des Handgelenks genutzt werden, da sich in diesem Bereich zusätzlich das Gelenk für die Drehung des Unterarms befindet. Die dünnste Stelle im menschlichen Unterarm ist das Handgelenk, was nach Möglichkeit im Roboterarm nachzubilden ist.

Schnittstelle zum untergeordneten Gelenkkomplex (Hand)

Das Handgelenk wird mit einer Hand verbunden, die in einem Teilprojekt des Sonderforschungsbereiches 588 entstanden ist¹¹⁸ (Abbildung 7.2-1). Die Hand weist eine Gesamtlänge von 200 mm, eine Breite von 90 mm und eine Dicke von 40 mm auf. Sie wiegt 380 g, und der Massenschwerpunkt befindet sich mittig, 50 mm vor dem Anschlussflansch, in der Handfläche. Der TCP der Hand befindet sich 60 mm oberhalb des Flansches. Zwischen dem Handgelenk und der Hand ist ein 6-Achsen-Kraftsensor der Firma ATI Industrial Automation¹¹⁹ anzubringen (Mini45 Force/Torque transducer). Dieser Sensor hat die Form einer Scheibe mit einer Hohlbohrung mit einem Außendurchmesser von 45 mm, einem Innendurchmesser von 9,5 mm und einer Dicke von 15,7 mm. Von der Hand ist ein flexibler pneumatischer Druckschlauch mit 3 mm Durchmesser in den Torso zu führen.

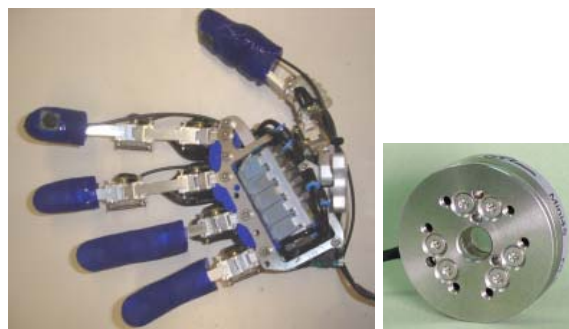


Abbildung 7.2-1: Hydraulisch angetriebene Hand und Kraftmessdose die zwischen Hand und Handgelenk anzubringen ist

¹¹⁸ Schulz 2003

¹¹⁹ ATI 2006

Weiterhin ist durch das Handgelenk ein Anschlusskabel zur Spannungsversorgung, ein Kabel für eine serielle Schnittstelle zum Controller in der Hand und das Anschlusskabel der Kraftmessdose in den Unterarm zu legen.

Technisches Mehrfachgelenk

Das Handgelenk verfügt über einen Freiheitsgrad in der Sagittal- und einen in der Frontalebene, die sich in einem Punkt schneiden (Kapitel 6.2.2). Der Bewegungsraum ist im Rahmen des menschlichen Vorbildes symmetrisch, um eine Nutzung des Gelenkkomplexes für den rechten und den linken Arm zu ermöglichen. Es wird eine Beweglichkeit um die transversale Drehachse von $\pm 60^\circ$ und um die dorsal-palmare Drehachse von $\pm 30^\circ$ gefordert (Abbildung 6.2-4).

Aktorik

Um 3 kg statisch in der Hand zu halten und um 1 kg in einer Sekunde um 90° von Stillstand zu Stillstand zu bewegen, werden in der ersten Abschätzung 2,5 Nm Drehmoment im Handgelenk benötigt. Allgemein werden von den Antrieben die in Kapitel 6.3.2 aufgeführten Eigenschaften gefordert.

Sensorik, Messung des Antriebsmoments und des Gelenkwinkels

Jedes Gelenk ist mit Sensoren zur Geschwindigkeits- und Winkelmessung und mit Sensoren zur Messung des Antriebsmoments zu versehen. Für den Fall, dass eine Integration von Sensoren zur Momentenbestimmung zu großen Gewichts- und Bauraumeinschränkungen führt, kann hierfür im Handgelenk die Kraftmessdose genutzt werden, die abtriebsseitig am Handgelenk angebracht ist.

Gelenkrechner

Als Gelenkrechner ist ein UCoM inklusive einer Leistungseinheit einzusetzen (Kapitel 6.4). Für dessen Montage ist ein Ort auszuwählen.

Tragstruktur

Der Unterarm ist als Hohlrohr aus einem Standardprofil aufzubauen, durch das die Verkabelungen geführt werden kann.

7.2.1.1 Modell des Gelenkkomplexes Handgelenk

In Abbildung 7.2-2 sind die Teilsysteme bzw. Systemelemente in einem Klassendiagramm dargestellt, die zusammen den Gelenkkomplex Handgelenk bilden. In diesem Diagramm ist keine Aussage über die physikalische Integration dieser Systemelemente enthalten.

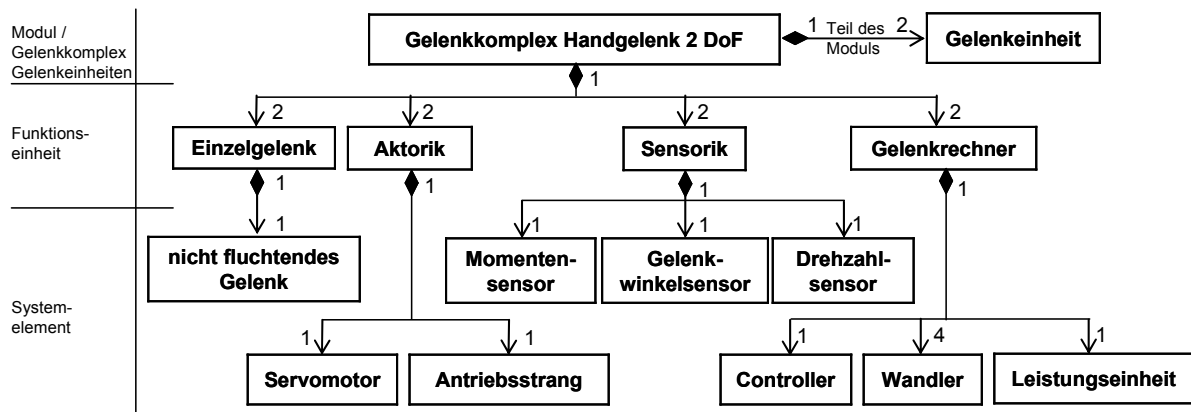


Abbildung 7.2-2: Klassendiagramm Handgelenk

7.2.2 Handlungsschritt: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks

Das Handgelenk verfügt über zwei sich senkrecht schneidende Drehachsen zweier nicht fluchtender Gelenke (Abbildung 7.2-3).

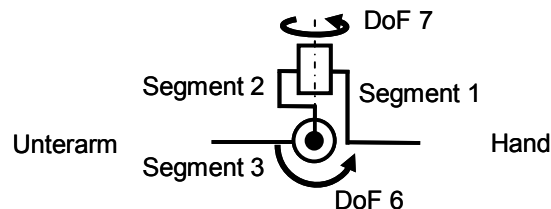


Abbildung 7.2-3: Kinematik und Komponenten der Tragstruktur im Handgelenk

Die Reihenfolge, in der die Pitch- und Yaw-Drehachse angeordnet sind, ergibt sich nicht aus der Bestimmung der Kinematik anhand der des Menschen (Abbildung 6.2-4). Eine Änderung der Reihenfolge entspricht einer Drehung des prinzipiellen Gelenks in Abbildung 7.2-3 um 90° entlang der Achse durch den Unterarm. Die inverse Kinematik existiert unabhängig von der Reihenfolge der Drehachsen. Aus diesem Grund ist für die Reihenfolge ausschlaggebend, in welcher Konstellation sich der gewünschte Bewegungsraum ergibt und die Aktorik und Sensorik integriert werden kann.

Mithilfe der hier in Frage kommenden Technischen Gelenke (Kapitel 5.2.2) ist es möglich, ein Mehrfachgelenk aufzubauen, das über die geforderten Eigenschaften verfügt. Der Entwurf des Technischen Gelenks ist im Rahmen einer konzeptionellen Verifikation mit den Funktionseinheiten abzugleichen, die Einfluss auf das Gelenk nehmen.

7.2.2.1 Konzeptionelle Verifikation des Technischen Mehrfachgelenks

Die Funktionseinheiten die bezüglich des Technischen Mehrfachgelenks zu verifizieren sind, haben sich in der DSM in Tabelle 4.2-4 ergeben.

Verifikation: Antriebskonzept – Sensor Antriebsmoment

Die Einzelgelenke sind über separate Gelenkantriebe mit Servomotoren anzutreiben (Kapitel 6.3.2). Es ist auf konzeptioneller Ebene abzuklären, ob an der Tragstruktur Bauraum für die Montage der Aktoren zur Verfügung steht.

Der Aktor für Gelenk 6 kann an dem Segment 3, ohne Überbrückung einer Drehachse, oder höher in der kinematischen Kette angebracht werden, da dort ausreichender Bauraum vorhanden ist. Für den Aktor von Gelenk 7 steht am Segment 2 kein ausreichender Bauraum zur Verfügung. Daher ist vom Antriebsstrang, der dieses Gelenk antreibt, mindestens die Drehachse von Gelenk 6 zu überbrücken. Zur Überbrückung einer nicht fluchtenden Drehachse, mit einem Bewegungsraum von $\pm 60^\circ$, stehen nur flexible Systemelemente im Antriebsstrang zur Verfügung (Anhang Kapitel 11.2). Um auch Systemelemente, die aus starren, gelenkig miteinander verbundenen Segmenten bestehen, auswählen zu können, ist das Gelenk mit dem kleineren Bewegungsraum als zu Überbrückendes auszuwählen. Hieraus ergibt sich die Reihenfolge, in der die beiden Drehachsen angeordnet sind. Das Gelenk 6 dreht um die dorsal-palmare Drehachse um $\pm 30^\circ$ und das Gelenk 7 um die transversale Drehachse um $\pm 60^\circ$.

Die im Antriebsstrang zu messenden Drehmomente sind niedrig, so dass für deren Bestimmung spezielle Sensoren benötigt werden, für die im Unterarm nicht genügend Bauraum vorhanden ist. Daher wird das Antriebsmoment im Handgelenk über die abtriebsseitige Kraftmessdose ermittelt.

Verifikation: Winkelsensorkonzept

Die beiden nicht fluchtenden Gelenke weisen mehrere Flächen auf, die sich zueinander bewegen und an denen eine Winkelmessung vorgenommen werden kann (Tabelle 5.4-2). Jedoch ist für ein Anbringen der in Kapitel 6.3.3 beschriebenen pseudoabsoluten Sensoren der Bauraum im Handgelenk zu klein.

Verifikation: Integration der Gelenkrechner

Der Gelenkrechner ist am Unterarm oder an übergeordneten Segmenten zu montieren. Das Mehrfachgelenk und die daran anschließende Tragstruktur müssen so aufgebaut werden, dass die Sensoren und Aktoren des Gelenkkomplexes und die Hand über elektrische Kabel mit dem Gelenkrechner zu verbinden sind.

Verifikation: Tragstrukturen im und am Technischen Gelenk

Das Handgelenk besteht aus zwei seriell angeordneten Gelenken. Daher befinden sich im und am Handgelenk drei Segmente der Tragstruktur. Ein Segment reicht vom Ellbogengelenk über den Unterarm bis zum Gelenk DoF 6 im Handgelenk. Das zweite Segment verbindet die beiden Gelenke DoF 6 und DoF 7. Das dritte Segment wird von dem zweiten Gelenk bewegt und reicht bis zu dem Anschlussflansch der Hand. Die

prinzipiellen Segmente sind in Abbildung 7.2-3 dargestellt. Zur Hand und zum Ellbogengelenk sind mehrere elektrische Kabel zu verlegen. Es existieren Technische Mehrfachgelenke, die in ihrer Tragstruktur eine solche Verkabelung ermöglichen (Kapitel 5.2.3.1).

7.2.2.2 Ergebnis des Entwurfs des Technischen Mehrfachgelenks

Als Mehrfachgelenk (Abbildung 7.2-4) wird die Kombination aus zwei nicht fluchtenden Einzelgelenken gewählt, die aufgrund des großen Bewegungsraumes, der internen Hohlstruktur des Gelenks und der vergleichsweise kompakten Außenabmessung in Abbildung 5.2-14, als Kombination b) empfohlen wird.

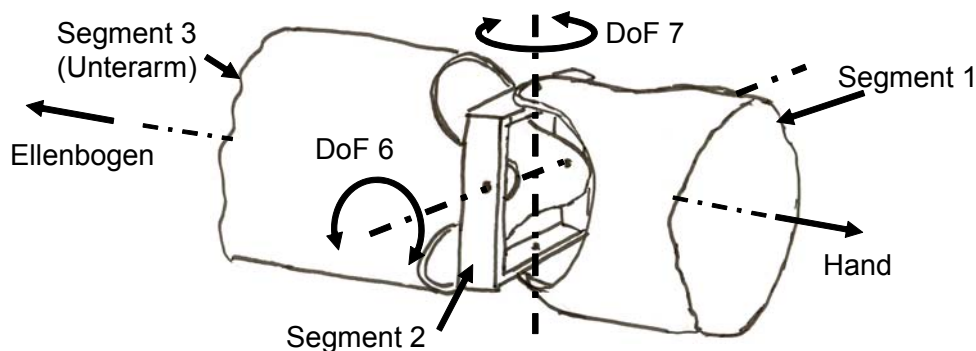


Abbildung 7.2-4: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks des Handgelenks

Der Unterarm ist, wie gefordert, aus einem Hohlprofil aufgebaut. Ob das Segment 2 das Segment 3 umschließt oder umgekehrt, ergibt sich aus der Anatomie des Menschen. Der dünnste Durchmesser des Unterarms, kurz vor dem Handgelenk, ist maßgebend. Für zusätzliche Bauteile im Handgelenk ist dessen Innenraum möglichst groß zu gestalten. Um dies zu ermöglichen, sollte das Gelenk selbst einen größeren Durchmesser als die Unterarmtragstruktur aufweisen. Daher umschließt das Segment 2 das Segment 3 und das Segment 1 das Segment 2.

7.2.3 Handlungsschritt: Entwurf der Aktorik

Zuerst werden im Entwurf der Aktorik die Segmente der Tragstruktur im Mehrkörpersystem bestimmt, an denen der Aktor angebracht werden kann. Im nächsten Schritt wird abgeklärt, ob Systemelemente des Antriebstrangs existieren, mit denen der Aktor an der jeweiligen Position prinzipiell mit dem Gelenk verbunden werden kann. Hiernach wird ein Standort für den Aktor ausgewählt und der Antriebsstrang aus Systemelementen kombiniert, die zusammen die gewünschten Eigenschaften und Funktionen erfüllen. Hiernach findet eine konzeptionelle Verifikation des Antriebstrangs bezüglich der Funktionseinheiten statt, die sich in der DSM Tabelle 4.2-4 ergeben haben. Am Ende dieses Kapitels wird das Ergebnis dieses Entwurfs vorgestellt.

Für den Entwurf der Aktorik gelten die Voraussetzungen aus Kapitel 6.3.2.

7.2.3.1 Standort für die Aktoren

In diesem Kapitel werden die Standorte für die beiden Aktoren des Handgelenks bestimmt. Alle in diesem Kapitel gemachten Aussagen über Eigenschaften der Systemelemente im Antriebsstrang beziehen sich auf die Tabellen im Anhang (Kapitel 11.2), in denen die Systemelemente mit Zugriff auf ihre hier relevanten Eigenschaften aufgelistet sind.

Orte im Mehrkörpersystem für den Aktor des Gelenks 7

1. Fall: 0 überbrückte Gelenke

Der Antrieb müsste in diesem Fall auf dem Segment 2 der Tragstruktur angebracht werden, da im Inneren nicht genügend Bauraum vorhanden ist. Dieser Ort wurde in Kapitel 6.3.2 ausgeschlossen, da sich der Aktor durch die Bewegungen von Gelenk 6 aus dem Gelenk heraus bewegt.

2. Fall: 1 überbrücktes Gelenk

Der Aktor ist am Segment 3, dem Unterarm, anzubringen. Der Antriebsstrang muss die Drehachse von DoF 6 mit einem Bewegungsraum von $\pm 30^\circ$ passiv überbrücken. Es stehen mehrere Systemelemente des Antriebsstrangs zur Verfügung, mit denen dies möglich ist. Aufgrund des beschränkten Bauraums kann das Gelenk 6 von den zur Verfügung stehenden Systemelementen des Antriebsstrangs nur coaxial zur angetriebenen Drehachse überbrückt werden. Vorteile dieses Standorts sind der im Unterarm vorhandene Bauraum und der kleine passiv zu überbrückende Winkel im Gelenk 6. Nachteilig ist der große Beitrag der Antriebskomponenten im Unterarm zu der Drehmasse des Arms.

3. Fall: 2 überbrückte Gelenke

Zusätzlich zu dem in Fall 1 beschriebenen Gelenk ist die Roll-Achse der Unterarmdrehung zu überbrücken. Ein Ausgleich für diese Bewegung ist mit vielen Systemelementen zu realisieren, wenn sie sich im Zentrum der Roll-Drehachse befinden. Dies scheidet allerdings prinzipiell nach der Voraussetzung aus, dass von einer Anbringung des Aktors in einem übergeordneten Gelenkkomplex abzusehen ist (siehe Kapitel 6.3.2).

4. Fall: 3 überbrückte Gelenke

Der Antrieb wird im Oberarm montiert und muss daher die Pitch- und die Roll-Drehachse des Ellbogens und die Pitch-Drehachse des Handgelenks überbrücken. Dies ist nur mit flexiblen Systemelementen des Antriebsstrangs möglich. Die flexiblen Systemelemente des Antriebsstrangs werden um einen kleinen Biegeradius und um einen großen Winkelbereich im Ellbogengelenk passiv bewegt. Aus diesem Grund würde hier nur ein hydraulisches Antriebsstrangsegment in Frage kommen. Ein

solcher Antriebsstrang ermöglicht eine weitere Auslagerung des Aktors in den Torso des Roboters, was aufgrund der besseren Massenverteilung zu bevorzugen ist.

5. Fall: 4 überbrückte Gelenke

Dies hat eine Montage des Aktors im Gelenkkomplex der Schulter zur Folge, was nach den Voraussetzungen ausscheidet.

6. Fall: Auslagern

Für die Art des Antriebsstrangs, der dies ermöglicht, gilt das Gleiche wie im 4. Fall. Vorteilhaft bei dieser Lösung ist die komplette Auslagerung des Motors aus dem Arm. Nachteilig sind die zusätzlichen Systemkomponenten für den Betrieb eines hydraulischen Antriebsstrangs im Handgelenk, was den Gewichtsvorteil wieder aufbraucht.

Orte im Mehrkörpersystem für den Aktor des Gelenks 6

1. Fall: 0 überbrückte Gelenke

Der Antrieb befindet sich im Unterarm. Vorteilhaft an dieser Variante ist, dass der Antriebsstrang keine passive Drehachse aufweisen muss. Nachteilig ist der Beitrag zur Drehmasse des Arms.

2. Fall: 1 überbrücktes Gelenk

Das zu überbrückende Gelenk verfügt über eine Roll-Drehachse. Der Aktor müsste im oder am Gelenkkomplex des Ellbogengelenks angebracht werden, wofür nicht genügend Bauraum vorhanden ist. Des Weiteren ist von einer Unterbringung des Aktors in einem übergeordneten Gelenkkomplex abzusehen.

3. Fall: 2 überbrückte Gelenke

Der Antriebsstrang überbrückt das fluchtende und das nicht fluchtende Gelenk des Ellbogens und wird im Oberarm angebracht. Aufgrund der großen Beweglichkeit der zu überbrückenden Gelenke ist es notwendig, einen flexiblen Antriebsstrang einzusetzen. Dieser entspricht dem 4. Fall für den Antrieb des Gelenks 7.

4. Fall: 3 überbrückte Gelenke

Eine Platzierung des Aktors im Gelenkkomplex der Schulter ist nicht möglich.

5. Fall: Auslagern

Eine Auslagerung ist hier nur mit einem flexiblen Antriebsstrang zu bewerkstelligen. Für die Platzierungsmöglichkeiten gelten die gleichen Bedingungen wie im 6. Fall für den Antrieb des Gelenks 7.

Mögliche Orte für die Aktoren

Für die Anbringung der beiden Antriebe existieren zwei sinnvoll zu nutzende Tragstruktursegmente. Bei dem einen handelt es sich um den Unterarm, an dem ausreichend Bauraum zur Verfügung steht. Bei dem anderen Segment handelt es sich um den Torso, in den die Aktoren ausgelagert werden. Dies ist aufgrund des großen Bewegungsraums in der Schulter und im Ellbogen nur mit einem fluidischen Antriebsstrang möglich. Diese Antriebsvariante wurde für das Handgelenk des Arms der Version I gewählt (Kapitel 8.1.1). Zur Wandlung einer mechanischen Bewegung in einen Volumenstrom und wieder zurück werden hydraulische, beidseitig wirkende Zylinder eingesetzt (Abbildung 7.2-5).

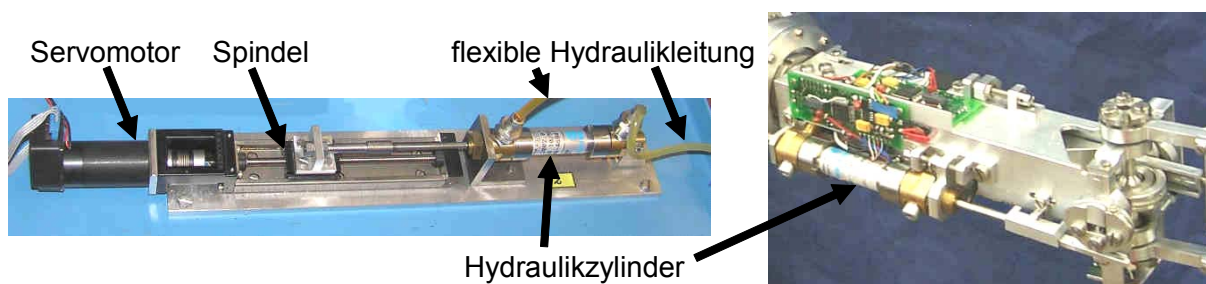


Abbildung 7.2-5: Antrieb eines Freiheitsgrads im Handgelenk des Arms der Version I

Die Aktoren der beiden Gelenke der Arm-Version III sind in den Unterarm integriert. Durch den Einsatz von leichten Systemelementen des Antriebsstrangs ist es möglich, die Masse des Unterarms klein zu halten. Eine Auslagerung des Aktors in den Torso führt nicht zu einer signifikanten Gewichtsverringerung, da die zusätzlichen Systemelemente des Antriebsstrangs diesen Vorteil wieder zunichte machen. Hierbei handelt es sich um hydraulische Zylinder, die den Volumenstrom des Öls in eine translatorische Bewegung wandeln. Ein weiterer Nachteil einer hydraulischen Lösung ist der immer vorhandene Leckagefluss von hydraulischer Flüssigkeit, der auszugleichen und bei einem Einsatz des Roboters in der Küche des Menschen nicht zu tolerieren ist.

7.2.3.2 Systemelemente Antriebsstrang

Räumliche Bedingungen für den Entwurf des Antriebsstrangs

Aufgrund der in Abbildung 7.2-6 dargestellten Bauraumsituation bietet es sich an, die länglichen Servomotoren ebenfalls längs im Unterarm zu platzieren. Für eine günstige Gewichtsverteilung im Unterarm sind die massereichen Aktoren zentral im Unterarm und nahe am Ellbogen zu platzieren.

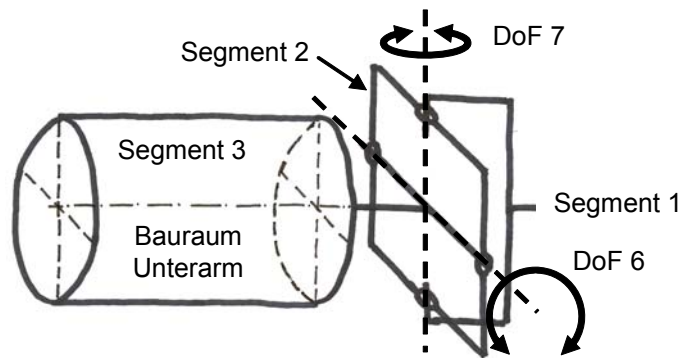


Abbildung 7.2-6: Bauraum für den Antrieb des Handgelenks

Antriebsstrang für das Gelenk 7

Der Antriebsstrang von Gelenk 7 überträgt die Antriebsleistung passiv über die Pitch-Drehachse 6. Das anzutreibende Gelenk besitzt eine Jaw-Drehachse. Der Antriebsstrang muss klein, leicht und spielfrei sein und muss die notwendige Übersetzung aufweisen. Der Aktor ist ein Servomotor mit rotierender Ausgangswelle, und der Abtrieb erfolgt über das rotierend angetriebene Segment 1. Die zu überbrückende Drehachse steht senkrecht auf dem Antrieb und senkrecht auf dem Abtrieb. Antrieb und Abtrieb sind ebenfalls senkrecht zueinander ausgerichtet. Die Funktionen und Eigenschaften des Antriebsstrangs sind in Abbildung 7.2-7 dargestellt.

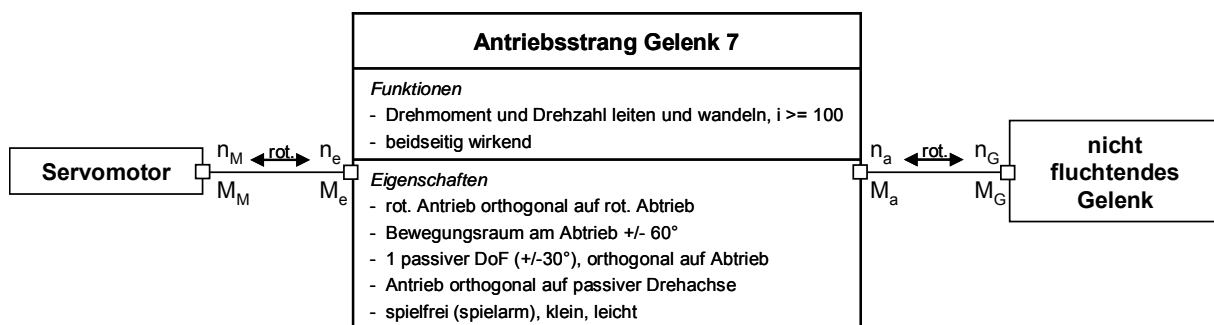


Abbildung 7.2-7: Antriebsstrang für das Gelenk 7

Primär ist zu entscheiden, ob in dem Antriebsstrang nur Systemelemente eingebaut werden, die aus starren Komponenten bestehen, oder auch aus flexiblen Systemelementen. Flexible Systemelemente benötigen zusätzliche Systemelemente, welche die Antriebsleistung vom Aktor zu diesem flexiblen Antriebsstrang übertragen und vom diesem zum anzutreibenden Segment. Hierfür steht im Handgelenk nicht der notwendige Bauraum zur Verfügung. In dem beschränkten Bauraum des Handgelenks ist ein Systemelement zu integrieren, das über eine passive Pitch-Drehachse verfügt. Hierfür kann ein homokinetisches Gelenk oder eine kardanisch angetriebene Welle genutzt werden (Anhang Kapitel 11.2). Das homokinetische Gelenk überbrückt die Drehachse unabhängig zur Winkelstellung des passiven Gelenks, kann allerdings in dem Bauraum nicht integriert werden und weist ein hohes Eigengewicht auf. Aus diesem Grund wird eine kardanisch angetriebene Welle zur Überbrückung der

Drehachse eingesetzt. Diese ist über den Kardanfehler von der Winkelstellung der überbrückten Drehachse abhängig. Der Antriebsstrang, der zwischen der kardanisch angetriebenen Welle und dem Servomotor anzubringen ist, leitet das Antriebsmoment im rechten Winkel und weist eine große Übersetzung auf. Ein leichtes und spielfreies Systemelement, dessen Antrieb orthogonal mit Versatz auf dem Abtrieb steht, ist ein Seilzug oder ein Zahnriemen, der um zwei Umlenkrollen geführt und translatorisch angetrieben wird. Ein Zahnriemen bietet sich hier an, da der Zahnriemen die Antriebsscheibe des Kardangelenks mit Formschluss führt. Für den Antrieb des Zahnriemens wird ein Systemelement benötigt, das die Rotationsbewegung des Servomotors in eine Linearbewegung wandelt, eine ausreichend große Übersetzung bietet und leicht ist. Diese Bedingungen erfüllt eine Kugelumlaufspindel. In Abbildung 7.2-8 sind die Funktionen und Eigenschaften der Systemelemente dargestellt, die zusammen die geforderten erfüllen.

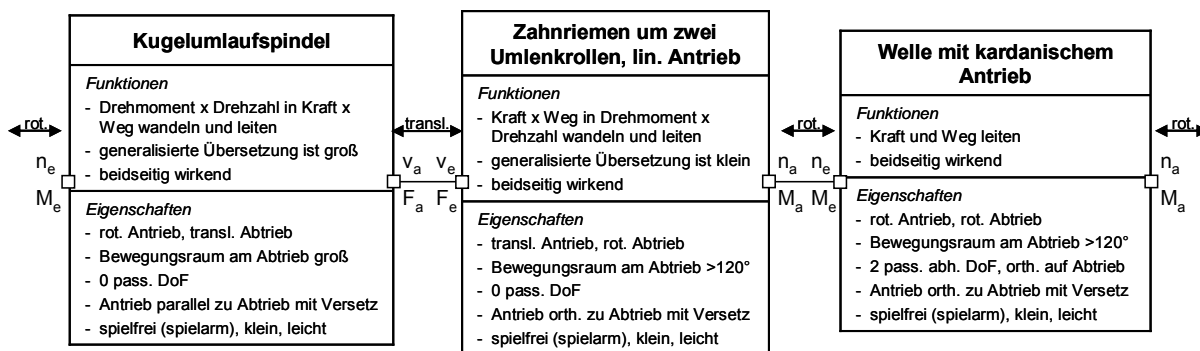


Abbildung 7.2-8: Systemelemente des Antriebsstrangs für das Gelenk 7

Abbildung 7.2-9 zeigt das Konzept des Antriebsstrangs.

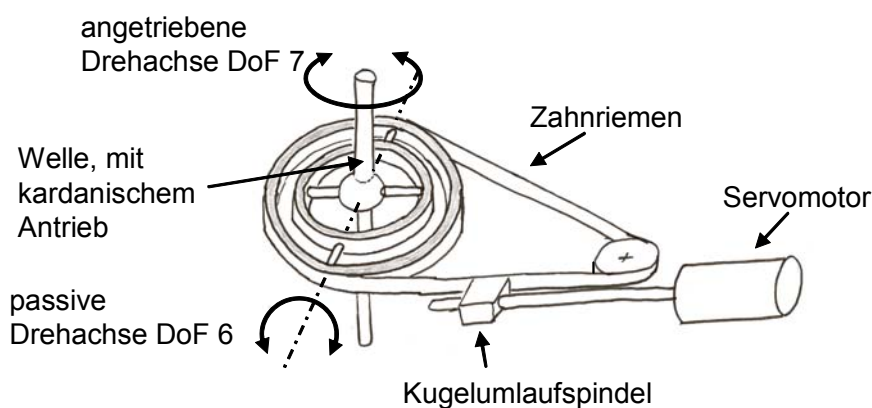


Abbildung 7.2-9: Konzept für den Antrieb des Gelenks 7

Antriebsstrang für das Gelenk 6

Der Antrieb von Gelenk 6 sollte orthogonal zur angetriebenen Drehachse im Unterarm angebracht werden und ein geringes Eigengewicht sowie die notwendige Übersetzung aufweisen (Abbildung 7.2-10). Der Antrieb ist am Rand des Unterarmrohres gegenüber dem Antrieb von Gelenk 7 anzubringen, da nur dort genügend Bauraum vorhanden ist.

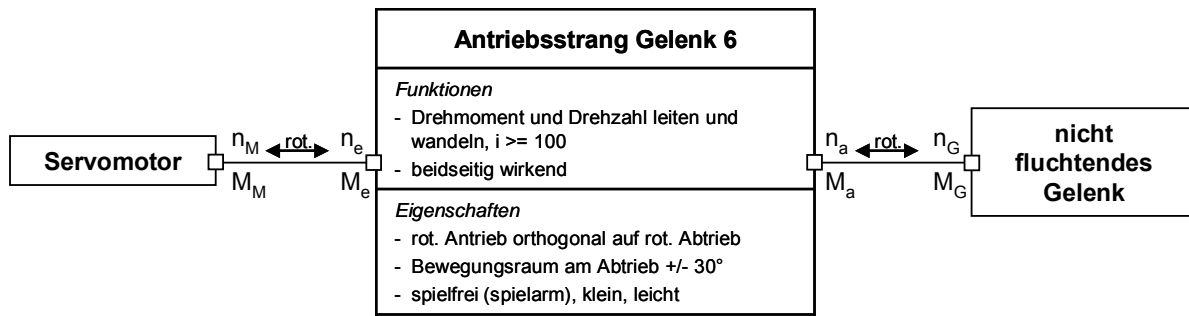


Abbildung 7.2-10: Antriebsstrang für das Gelenk 6

Um die Antriebsleistung in einem kleinen Bauraum um 90° umzulenken und dabei eine ausreichende Übersetzung zu ermöglichen bietet es sich an, den gleichen Antriebsstrang, ohne die kardanisch angetriebenen Welle, wie für Gelenk 7 einzusetzen. Der Servomotor treibt eine Kugelumlaufspindel an, die aus Platzgründen nicht über einen Zahnriemen mit dem anzutreibenden Segment verbunden ist, sondern über einen Seilzug (Anhang, Tabelle 11.2-1).

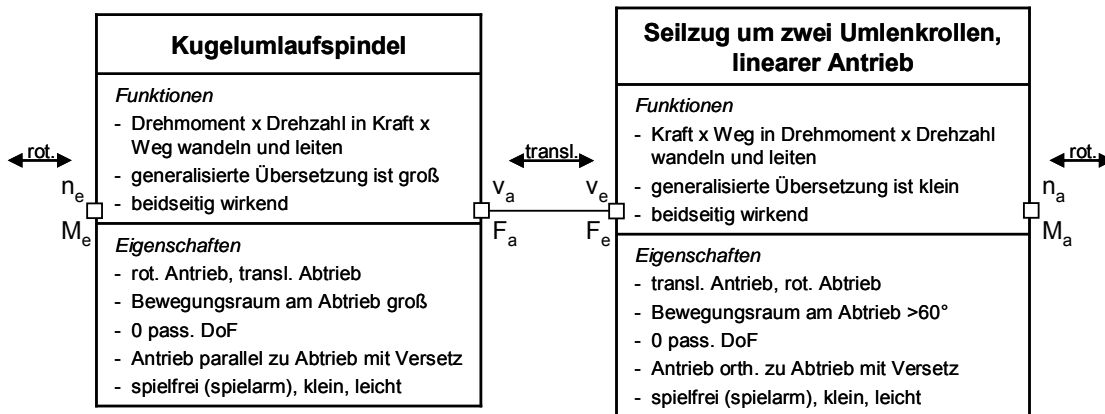


Abbildung 7.2-11: Systemelemente des Antriebsstrangs für das Gelenk 6

Das Konzept des Antriebsstrangs für das Gelenk 6 ist in Abbildung 7.2-12 dargestellt.

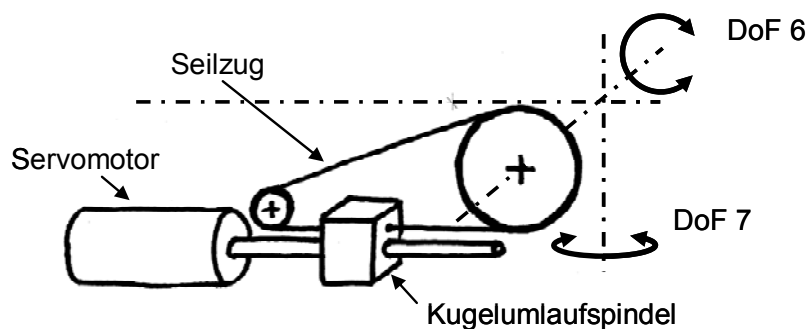


Abbildung 7.2-12: Konzept für den Antrieb des Gelenks 6

7.2.3.3 Konzeptionelle Verifikation der Aktorik

Verifikation: Winkelsensorkonzept

Der Antrieb des Gelenks 7 wird durch das Innere des Handgelenks geleitet. Daher steht für die Winkelsensoren im Inneren des Gelenks kein ausreichender Bauraum zur

Verfügung. Die Sensoren sind am Äußeren der Gelenke anzubringen. Zwischen den Segmenten 1, 2 und 2, 3 gibt es verschiedenen Wirkflächen, die sich für eine Winkelmessung eignen, und es existieren Winkelsensoren, die in diesem Bauraum integriert werden können.

Verifikation: Gelenkrechnereinheit

Der Bauraum für die Gelenkrechnereinheit des Handgelenks beschränkt sich im Unterarm auf den Bereich zwischen der Tragstruktur und der Verkleidung, da im Inneren aufgrund der Aktoren zuwenig Bauraum vorhanden ist. Weitere Möglichkeiten bestehen im Oberarm oder im Torso.

Verifikation: Tragstrukturkonzept

Die Tragstruktur kann so aufgebaut werden, dass die Aktoren daran oder darin montiert werden. Dies ist mit den Möglichkeiten für die Fertigung dieser Komponenten abzustimmen.

Verifikation: Schnittstelle zum Modul darüber

Über die Schnittstelle zum Ellbogengelenk sind eine Bus-Leitung zum Zentralrechner und eine Spannungsversorgung in den Unterarm zu führen. Weiterhin sind die Anschlüsse zum Gelenkrechner des Handgelenks, wenn dieser oberhalb des Ellbogens angebracht wird, durch den Ellbogen zu führen. Es ist dafür zu sorgen, dass die Antriebe kompakt in den Unterarm eingesetzt werden, um genügend Bauraum im Unterarm für das Einzelgelenk der Drehung des Unterarms, das zum Ellbogengelenk-komplex gehört, bereit zu stellen.

7.2.3.4 Ergebnis des Entwurfs der Aktorik

In Abbildung 7.2-13 sind die Aktorik und das Mehrfachgelenk des Handgelenks dargestellt.

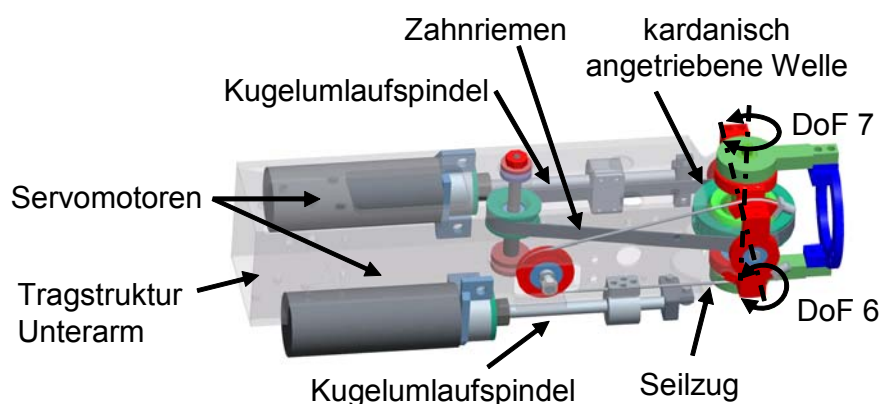


Abbildung 7.2-13: Antriebseinheiten Handgelenk (CAD-Modell, Vordruck auf die fertige Konstruktion)

7.2.4 Handlungsschritt: Entwurf der Sensorik

Mithilfe konzeptioneller Verifikationen des Technischen Gelenks und der Aktorik wurde sichergestellt, dass die von den Sensoren geforderten Bedingungen zu erfüllen sind. Im Folgenden werden die Sensoren entworfen, die in das Handgelenk zu integrieren sind. Hiernach erfolgt eine konzeptionelle Verifikation bezüglich der Funktionseinheiten, die sich in der DSM in Tabelle 4.2-4 ergeben haben.

7.2.4.1 Geschwindigkeitssensorentwurf

Als Sensoren werden Encoder eingesetzt, die vom Hersteller an den Servomotoren angebracht sind.

7.2.4.2 Kraftsensorentwurf

Das Antriebsmoment in Handgelenk wird über die 6-Achsen-Kraftmessdose bestimmt, die sich abtriebsseitig am Handgelenk befindet.

7.2.4.3 Winkelsensorentwurf

Von allen Winkelsensoren in den Gelenken des Arms weisen die Sensoren im Handgelenk den kürzesten Abstand zum Greifpunkt in der Hand auf. Daher sind die Anforderungen an die Exaktheit, mit der eine Gelenkposition bestimmt werden kann, für diese Sensoren die geringsten im Arm (Kapitel 6.3.3).

Einbauorte für die Sensoren

Für beide Drehachsen im Handgelenk werden die gleichen Winkelsensoren ausgewählt, da für sie die gleichen Anforderungen in Bezug auf die Messgenauigkeit und den Bauraum gelten und dies eine Vereinfachung für den Anschluss der Sensoren an den Gelenkrechner und für den Betrieb des Gelenks bietet.

Wirkflächenpaar für den Winkelsensor an Gelenk 6

Über die Relativposition von Segment 2 zu Segment 3 kann auf den Gelenkwinkel von DoF 6 geschlossen werden (Abbildung 7.2-14).

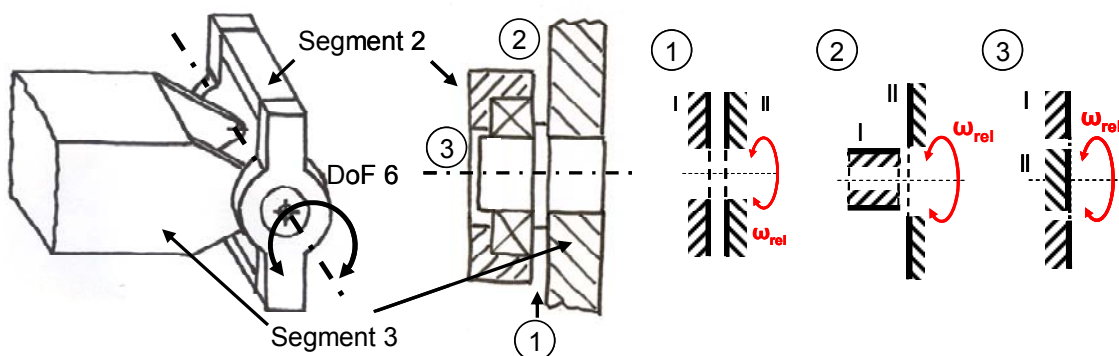


Abbildung 7.2-14: Wirkflächen am Gelenk 6, die für eine Winkelmessung genutzt werden können

An oder zwischen diesen beiden Segmenten ist daher der Sensor anzubringen. Am Gelenk bestehen drei Fälle, wie die Wirkflächen der Segmente einander zugeordnet sind. In Abbildung 7.2-15 sind die Wirkflächenpaare für den Winkelsensor an Gelenk 7 gekennzeichnet. Zwischen den Segmenten 1 und 2 bestehen zwei Fälle für die Anordnung der Wirkflächenpaare zueinander.

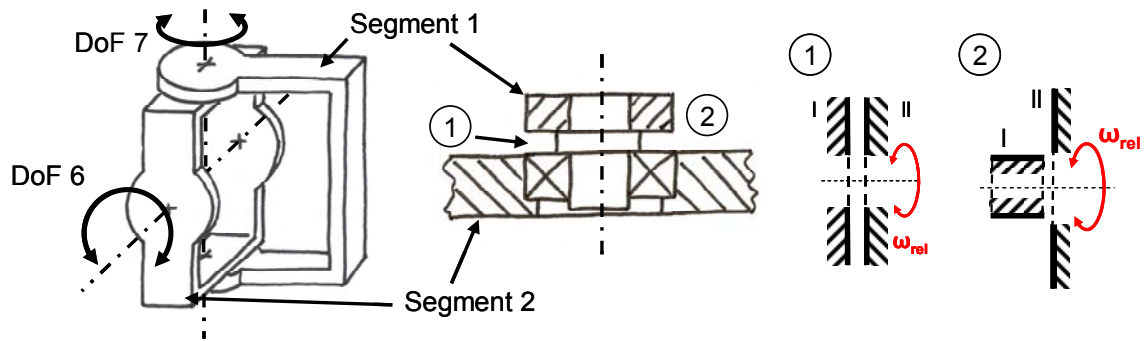


Abbildung 7.2-15: Wirkflächen am Gelenk 7, die für eine Winkelmessung genutzt werden können

Die Fälle 1 und 2 sind in den Gelenken 6 und 7 identisch. Der Fall 1 ist durch einen zu geringen Abstand zwischen den sich gegenüberliegenden Segmenten gekennzeichnet und der Fall 2 durch einen aufgrund der Bewegung des Gelenks zu kleinem Bauraum. Daher scheidet beide Fälle aus.

An Gelenk 6 ist es möglich, einen flachen Sensor an den Wirkflächen von Fall 3 anzubringen. Um den gleichen Sensor am Gelenk 7 anbringen zu können, muss an Segment 2 ein weiteres Wirkflächenpaar angebracht werden, das sich relativ zu Segment 1 bewegt.

Sensorauswahl

Bei dem eingesetzten Winkelsensor handelt es sich um ein rechteckiges, 2 mm hohes Potentiometer, in dessen Mitte sich ein beidseitig zugänglicher Mitnehmer, das Sensornebeneil, befindet. Im Gelenk 6 wird die Welle (Segment 3) so verlängert, dass sie in den Mitnehmer eingreift (Abbildung 7.2-16).

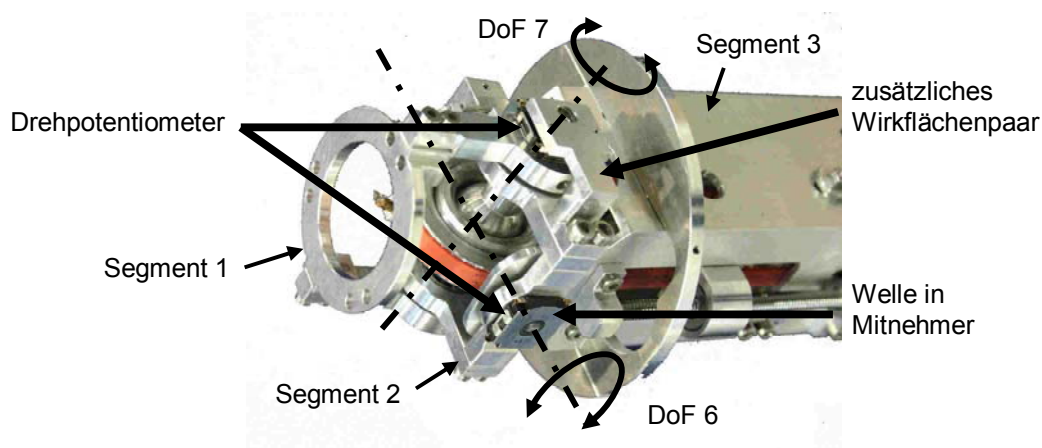


Abbildung 7.2-16: Winkelsensoren im Handgelenk (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

Der Sensorhauptteil ist mit dem Segment 2 verbunden. Für den Winkelsensor von Gelenk 7 wird ein zusätzliches Bauteil an dem Segment 2 angebracht, das über einen Mitnehmer mit dem Nebenteil des Sensors verbunden ist, dessen Hauptteil auf dem Segment 2 befestigt ist.

7.2.4.4 Konzeptionelle Verifikation der Sensorik

Die analogen Signale der Winkelsensoren können über Signalwandler, die im Gelenkrechner integriert sind, in ein digitales Signal gewandelt werden. Die Sensoren sind zu der Tragstruktur kompatibel.

7.2.5 Handlungsschritt: Entwurf der Gelenkrechner und der Tragstruktur

Der Entwurf der Gelenkrechner und der Entwurf der Tragstruktur sind aufgrund des benötigten Bauraums und der durch die Tragstruktur zu den Gelenkrechnern zu verlegenden Verkabelung wechselseitig voneinander abhängig (siehe DSM in Tabelle 4.2-4).

Der UCoM, in dem die beiden Gelenkrechner integriert sind, kann aufgrund seiner Größe nicht in oder an der Tragstruktur des Unterarms angebracht werden. Er ist daher an einem übergeordneten Segment anzubringen. Die Anschlusskabel zu den Aktoren und Sensoren des Handgelenks sind zu dem Gelenkrechner zu führen.

Die Tragstruktur des Unterarms ist aufgrund der Formsteifigkeit als Hohlrohr aufzubauen. Das Hohlrohr des Unterarms ist auf vielfältige Weise zu bearbeiten, um die Komponenten der Aktorik, Sensorik und Verkabelung daran anbringen zu können. Um die Verarbeitung zu vereinfachen, wird die Tragstruktur des Unterarms aus einem rechteckigen Hohlrohr spanend modelliert. Seine endgültige Außenform erhält der Unterarm durch eine am Schluss anzubringende Verkleidung. Die Tragstruktur ist in der Abbildung 7.2-13 und der Abbildung 7.2-16 dargestellt.

7.2.6 Ergebnis aus dem Systementwurf des Teilsystems des Handgelenks

Das Ergebnis dieses Kapitels ist ein CAD-Modell des Handgelenkentwurfes. In Abbildung 7.2-17 ist dieser Entwurf, um eine bessere Darstellung zu ermöglichen, mit Fotos vom Handgelenk des fertigen Prototypen dargestellt.

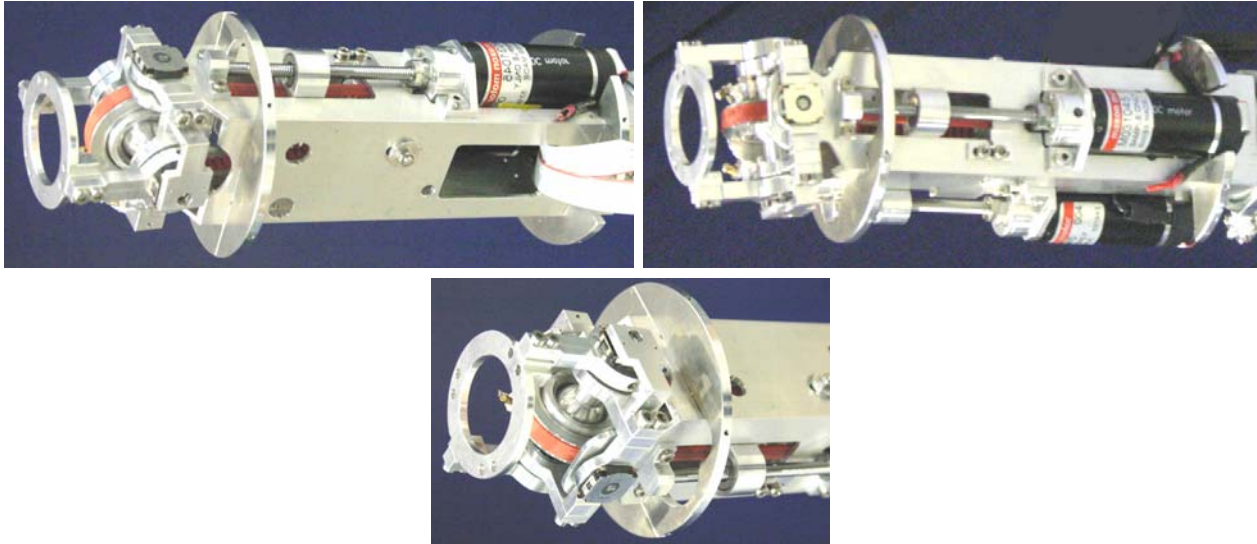


Abbildung 7.2-17: Ergebnis aus dem Entwurf des Teilsystems des Handgelenks (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

7.3 Prozessabschnitt: Systementwurf Gelenkkomplex Ellbogengelenk

In diesem Kapitel wird der Prozessabschnitt für den Systementwurf von Teilsystemen (Abbildung 7.1-1) auf den Entwurf des Gelenkkomplexes im Ellbogen des Roboters angewandt.

7.3.1 Anforderungen an das Ellbogengelenk

Im Folgenden werden die allgemeinen Anforderungen an den Arm auf die Gelenkkomplexe des Ellbogens abgebildet.

Übergeordnete Bedingungen

Das Ellbogengelenk und die umgebenden Tragstrukturen sollen eine geringe Masse und eine möglichst geringe Drehmasse bei Bewegungen um die Drehachsen des Schultergelenks aufweisen. Das Äußere des Gelenks soll humanoid wirken. Der Oberarm ist mit einer taktilen Haut zu verkleiden.

Bauraum

Das Ellbogengelenk ist, entsprechend der menschlichen Anatomie, gegenüber der Drehachse des Oberarms nach vorne und nach außen versetzt (Abbildung 6.2-7). Entlang dieser Achse ist das Gelenk, Ellbogen Beugen, 310 mm vom Drehpunkt der Schulter entfernt. Die äußeren Konturen des Gelenks und des Oberarms sollen sich an denen des Menschen orientieren.

Schnittstelle zum untergeordneten Gelenkkomplex (Handgelenk)

Durch die rechteckige Tragstruktur des Unterarms sind die Anschlusskabel zu den Motoren und Sensoren im Unterarm und die Bus-Leitung zur Hand zu führen. Die Hand wiegt 380 g und des Handgelenk mit Unterarm 940 g.

Technisches Mehrfachgelenk

Das Mehrfachgelenk im Ellbogen enthält zwei Gelenke, deren Drehachsen sich in einem Punkt schneiden. Die Gelenkeinheit Unterarm Drehen könnte auch dem Handgelenk zugeordnet werden, da beide Gelenkkomplexe von der Drehachse des Unterarms geschnitten werden. Da die Antriebseinheiten für dieses Gelenk im Ellbogengelenk oder höher in Mehrkörpersystem angebracht sind, wird es dem Gelenkkomplex Ellbogen zugeordnet. Der Unterarm kann sich von der Supinationsstellung zur Pronationsstellung um mindestens 240° drehen, und das Gelenk Ellbogen Beugen kann mit -10° überstreckt und mit 150° angewinkelt werden (Abbildung 6.2-7).

Aktorik

Um 3 kg statisch in der Hand zu halten und um 1 kg in einer Sekunde um 90° vom Stillstand zum Stillstand zu bewegen, werden in der ersten Abschätzung 14 Nm Drehmoment in der Beugeachse und 3 Nm Drehmoment in der Roll-Achse des Ellbogens benötigt. Vom Antrieb werden die in Kapitel 6.3.2 aufgeführten Punkte gefordert.

Sensorik, Messung des Antriebsmoments und des Gelenkwinkels

Jedes Gelenk ist mit Sensoren für eine Geschwindigkeits-, eine Winkel- und eine Momentenmessung zu versehen.

Gelenkrechner

Als Gelenkrechner sind ein UCoM und eine Leistungseinheit an einer geeigneten Stelle im Roboter unterzubringen und mit den elektronischen Komponenten des Ellbogengelenks zu verbinden.

Tragstruktur

Zum Oberarm ist eine Tragstruktur zu führen, die eine hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht aufweist und die Integration aller Funktionseinheiten ermöglicht.

7.3.1.1 Modell des Gelenkkomplexes Ellbogengelenk

In Abbildung 7.3-1 sind die Teilsysteme bzw. Systemelemente dargestellt, die zusammen den Gelenkkomplex Ellbogengelenk bilden. In diesem Diagramm ist keine Aussage über die physikalische Integration dieser Systemelemente enthalten.

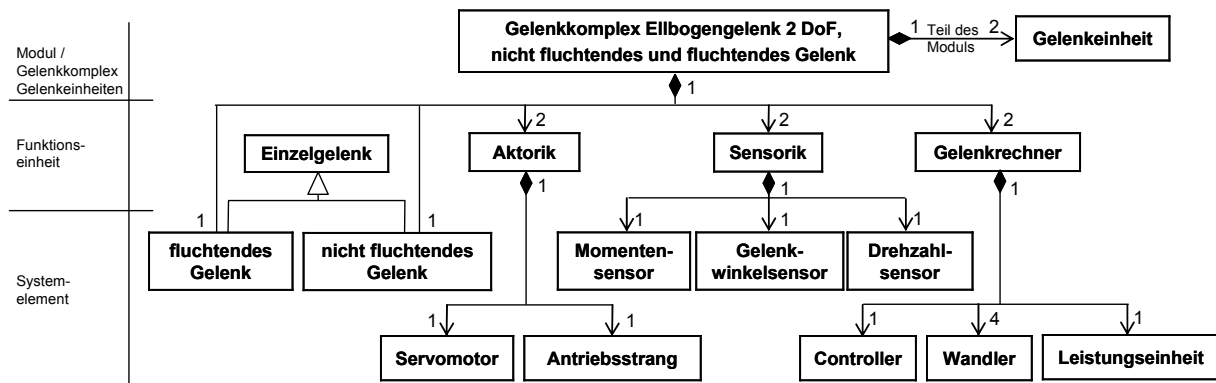


Abbildung 7.3-1: Klassendiagramm Ellbogengelenk

7.3.2 Handlungsschritt: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks

Die Kinematik des Ellbogengelenks ist in Abbildung 7.3-2 schematisch dargestellt. Für den Versatz der Körperachsen und der Beweglichkeit siehe Abbildung 6.2-7.

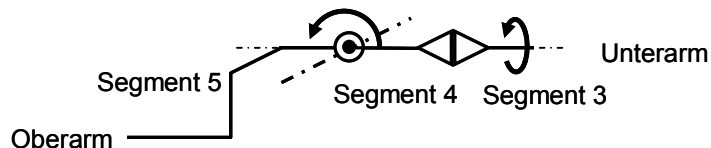


Abbildung 7.3-2: Anordnung der Drehachsen im Ellbogengelenk des linken Arms

7.3.2.1 Konzeptionelle Verifikation des Technischen Mehrfachgelenks

Die Funktionseinheiten, die bezüglich des Technischen Mehrfachgelenks zu verifizieren sind, haben sich in der DSM in Tabelle 4.2-4 ergeben.

Verifikation: Antriebskonzept – Sensor Antriebsmoment

Für den Aktor der Unterarmdrehung (Gelenk 5) stehen das darüber liegende Ellbogengelenk, das Oberarmrohr und eine Auslagerung in den Torso als Bauraum zur Auswahl. Der Aktor der Beugebewegung des Ellbogens (Gelenk 4) kann im Oberarmrohr oder im Torso montiert werden. Das Oberarmrohr und auch der Torso bieten für beide Varianten ausreichend Bauraum für den Aktor, den Antriebsstrang und die Momentenmessung.

Verifikation: Winkelsensorkonzept

Die beiden Gelenke weisen mehrere Wirkflächenpaare auf, die sich zueinander bewegen und an denen eine Winkelmessung vorgenommen werden kann. Ein Anbringen der in Kapitel 6.3.3 beschriebenen pseudoabsoluten Sensoren ist in diesem Mehrfachgelenk aufgrund des ausreichenden Bauraums möglich.

Verifikation: Integration der Gelenkrechner

Die Lagerung der Drehachse des Unterarms ist dicht an der Beugeachse des Ellbogens zu platzieren, was zur Folge hat, dass im Ellbogen nicht genügend

Bauraum für den Gelenkrechner vorhanden ist, der somit höchstens an der Außenseite des Gelenks angebracht werden kann. Als übergeordnete Segmente kommen der Oberarm oder der Torso in Frage.

Verifikation: Tragstrukturen im und am Technischen Gelenk

Der Gelenkkomplex muss so aufgebaut sein, dass Stromkabel hindurchgeführt werden können. Für das fluchtende (4) und das nicht fluchtende Gelenk (5) stehen Technische Gelenke zur Verfügung, die eine interne Kabelführung ermöglichen (Kapitel 5.2.3.1). Aus Gründen der Steifigkeit bietet es sich an, als Tragstruktur für den Oberarm ebenfalls ein Hohlprofil einzusetzen.

7.3.2.2 Ergebnis des Entwurfs des Technischen Mehrfachgelenks

Als Mehrfachgelenk wird das aufgrund seiner Massenverteilung in Abbildung 5.2-15 Fall b) hervorgehobene ausgewählt. Die Segmente des Ober- und des Unterarms werden von Hohlprofilen gebildet. Dieses Gelenk ist in Abbildung 7.3-3 dargestellt.

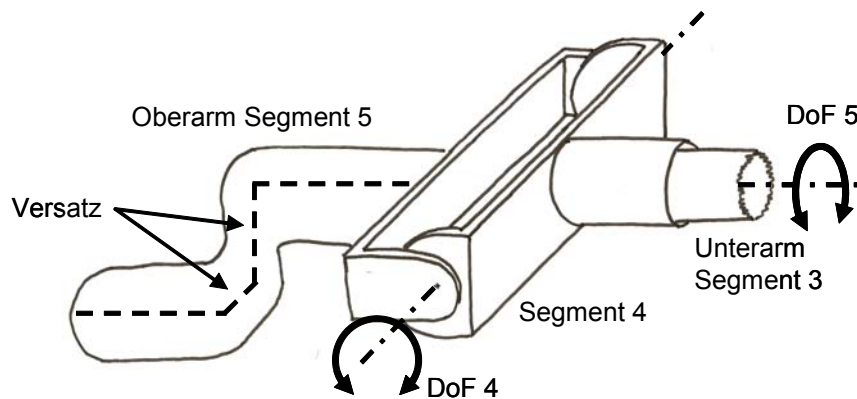


Abbildung 7.3-3: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks des Ellbogens (links)

7.3.3 Handlungsschritt: Entwurf der Aktorik

Zuerst werden im Entwurf der Aktorik die Segmente der Tragstruktur im Mehrkörpersystem bestimmt, an denen der Aktor angebracht werden kann. Im nächsten Schritt wird abgeklärt, ob Systemelemente des Antriebsstrangs existieren, mit denen der Aktor an der jeweiligen Position prinzipiell mit dem Gelenk verbunden werden kann. Hiernach wird ein Standort für den Aktor ausgewählt und der Antriebsstrang aus Systemelementen kombiniert, die zusammen die gewünschten Eigenschaften und Funktionen erfüllen. Hiernach findet eine konzeptionelle Verifikation des Antriebsstrangs bezüglich der Funktionseinheiten statt, die sich in der DSM Tabelle 4.2-4 ergeben haben. Am Ende dieses Kapitels wird das Ergebnis dieses Entwurfs vorgestellt.

Für den Entwurf der Aktorik gelten die Voraussetzungen aus Kapitel 6.3.2.

7.3.3.1 Standort für die Aktoren

Orte im Mehrkörpersystem für den Aktor des Gelenks 5

1. Fall: 0 überbrückte Gelenke

Der Aktor wird an der dem Gelenk übergeordneten Tragstruktur, dem Segment 4, angebracht. Im Inneren des Ellbogengelenks steht nur ein beschränkter Bauraum für die Integration des Aktors und des Antriebsstrangs zu Verfügung. Zusätzlich würde dies zu einer Vergrößerung des Segments 4 in Richtung des Handgelenks führen, was mit dem Bauraum für die Aktoren des Handgelenks im Unterarm nicht zu vereinbaren ist. Eine Platzierung des Aktors außerhalb des Ellbogengelenks würde zu Problemen mit der angestrebten anthropomorphen Form des Gelenks führen.

2. Fall: 1 überbrücktes Gelenk

Der Aktor wird an der Tragstruktur des Oberarms, dem Segment 5, angebracht. Das zu überbrückende nicht fluchtende Gelenk verfügt über eine Winkelbeweglichkeit von -10° bis 150° . Das nicht fluchtende Gelenk 5 kann nach Tabelle 5.3-3 mit flexiblen Systemelementen überquert werden oder durch einen Antriebsstrang, der entlang seiner Drehachse verläuft und diese dort wie ein fluchtendes Gelenk überbrückt. Für beide Varianten stehen mehrere Systemelemente zu Auswahl.

3. Fall: 2 überbrückte Gelenke

Von einer Unterbringung des Antriebs im Gelenkkomplex der Schulter ist abzusehen.

4. Fall: Auslagern

Für eine Auslagerung des Aktors ist es notwendig, einen flexiblen Antriebsstrang einzusetzen. Der Gelenkkomplex der Schulter ist daran anzupassen.

Orte im Mehrkörpersystem für den Aktor des Gelenks 4

1. Fall: 0 überbrückte Gelenke

Im Oberarm ist für eine Integration des Aktors ausreichend Bauraum vorhanden. Vorteile dieser Lösung sind, dass kein Gelenk zu überbrücken ist und der Aktor nahe am zentralen Drehpunkt des Arms, der sich in der Schulter befindet, angebracht werden kann.

2. Fall: 1 oder 2 überbrückte Gelenke

Von einer Unterbringung des Antriebs im Gelenkkomplex der Schulter ist abzusehen.

3. Fall: Auslagern

In diesem Fall gilt das Gleiche wie für den ausgelagerten Antrieb im 4. Fall des Gelenkes 5 mit der Vereinfachung, dass eine Überbrückung des nicht fluchtenden Gelenks im Ellbogen nicht notwendig ist.

Mögliche Orte für die Aktoren

Für die Anbringung der beiden Aktoren kommen zwei sinnvolle Segmente in Frage, der Oberarm und der Torso. Aufgrund der Größe des Aktors für das Beugen des Ellbogens (Gelenk 4) ist dessen Auslagerung in den Torso vorteilhaft. Für die Überbrückung der drei Drehachsen in der Schulter ist ein flexibler Antriebsstrang notwendig. Der Aktor für die Drehung des Unterarms kann im Oberarm montiert werden, da der Antrieb aufgrund des geringeren Antriebsmoments kleiner ausfällt. Da der flexible Antriebsstrang für das Beugen des Ellbogens durch die Schulter geführt wird, bietet es sich an, die gleiche Art von Antriebsstrang für die Drehung des Unterarms einzusetzen und den Aktor ebenfalls in den Torso auszulagern.

7.3.3.2 Systemelemente Antriebsstrang

Räumliche Bedingungen für den Entwurf des Antriebsstrangs

Im Torso steht für beide Aktoren ein ausreichend großer Bauraum zur Verfügung. Beide Antriebsstränge sind durch den Gelenkkomplex der Schulter zu leiten und einer zusätzlich durch die Gelenkeinheit Ellbogen Beugen.

Antriebsstrangsegmente 5

Der Antriebsstrang überbrückt vier Drehachsen. Dies geschieht in der vom Aktor aus betrachteten Reihenfolge: Roll, Pitch, Roll, Pitch. In Abbildung 7.3-4 sind die vom Antriebsstrang geforderten Eigenschaften und Funktionen dargestellt.

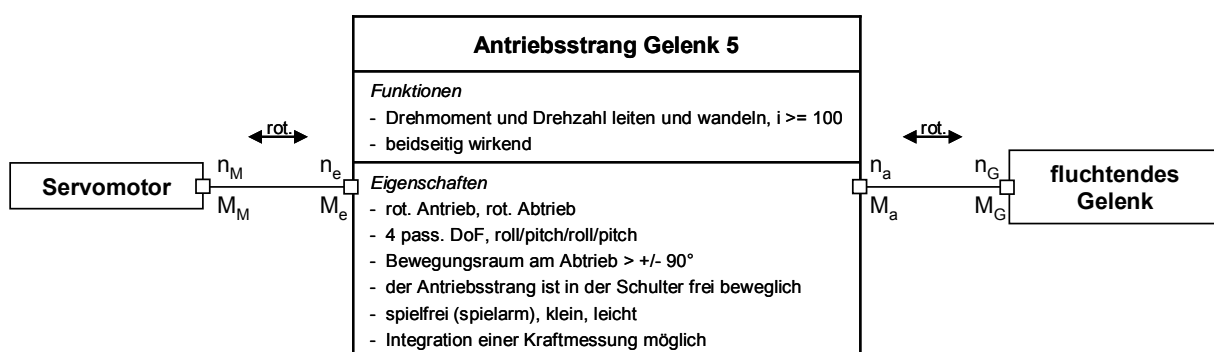


Abbildung 7.3-4: Antriebsstrang für das Gelenk 5

Aufgrund der Nachteile, die ein hydraulisches oder pneumatisches Systemelement im Antriebsstrang mit sich bringt (Kapitel 7.2.3.2), steht als flexibler Antriebsstrang nur ein Seilzug, der in einem Bowdenzug geführt wird, zur Verfügung. Die Biegung des Bowdenzugs im Ellbogen, die um einen kleinen Radius erfolgt und einen maximalen Biegewinkel von 150° aufweist, verursacht starke Reibkräfte am Seilzug. Dies ist

zwischen dem Ort im Seilzug, in dem die Zugkraft bestimmt wird, und dem angetriebenen Gelenk zu vermeiden. Für eine Zugkraftbestimmung ist der Seilzug für das Einbringen eines Sensors aufzutrennen. Aufgrund der großen translatorischen Bewegung des Seilzugs beim Antrieb der Drehbewegung um ca. 240° kann die Kraftmessung nicht im Gelenkkomplex des Ellbogens untergebracht werden. Im Oberarm steht hierfür ausreichend Bauraum zur Verfügung. Das nicht fluchtende Gelenk des Ellbogens kann, um eine Beeinflussung der Kraftmessung durch die Reibkräfte zu vermeiden, nicht mit einem Bowdenzug überbrückt werden. Seilzüge bieten die Möglichkeit, ein nicht fluchtendes Gelenk koaxial zur Drehachse zu überbrücken (Tabelle 5.3-3). Da Seilzüge nur Zugkräfte übertragen, sind für einen beidseitigen Antrieb des Gelenks zwei Seilzüge notwendig, die getrennt voneinander koaxial zur Drehachse das Gelenk überbrücken (Abbildung 7.3-5, rechts). Dies hat den positiven Nebeneffekt, dass eine im Seilzug eventuell auftretende Längenänderung aufgrund der Torsion des Seilzuges, bei einer Bewegung von Gelenk 4, durch den symmetrischen Systemaufbau ausgeglichen wird. Die Unterarmdrehung ist somit unabhängig zum Beugewinkel des Ellbogens. Die Seilzüge verlaufen frei, parallel zum Oberarm und bieten dort die Möglichkeit zur Integration eines Sensors zur Kraftmessung. Voraussetzung hierfür ist eine reibungsfreie Bewegung des Seilzugs von der Messstelle zum Gelenk. Um dies zu gewährleisten, werden die Seilzüge über gelagerte Seilscheiben zu der Drehachse und danach zu dem Gelenk geführt, wodurch die Reibung – im Vergleich zu einer Führung mit Bowdenzügen – signifikant verringert wird. In Abbildung 7.3-5 sind die Eigenschaften und Funktionen der Systemelemente des Antriebsstrangs, vom Oberarm bis zum Gelenk, und deren prinzipielle räumliche Anordnung dargestellt.

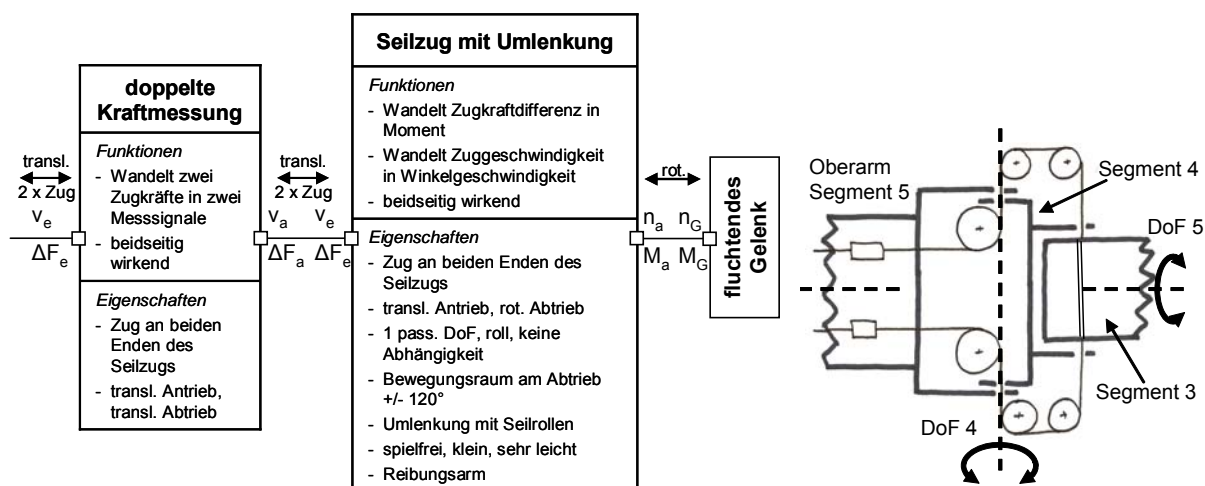


Abbildung 7.3-5: Systemelemente des Antriebsstrangs und Konzept für den Antrieb von Gelenk 5; vom Oberarm bis zum Gelenk

Nachteilig an diesem Konzept sind die beiden durch die Drehachsen von Gelenk 4 nach außen geführten Seilzüge, da sie das anthropomorphe äußere Erscheinungsbild

des Ellbogens beeinträchtigen. Ziel ist daher, die Breite des Ellbogens insgesamt klein zu halten.

Im Gelenkkomplex der Schulter ist ein fluchtendes, ein nicht fluchtendes und noch ein weiteres fluchtendes Gelenk zu überbrücken. Die Überbrückung der beiden fluchtenden Gelenke ist mit Seilzügen, die in Bowdenzügen entlang der Drehachsen geführt werden, in dem gewünschten Bewegungsraum durchführbar. Die Bowdenzüge werden bei einer Bewegung der Gelenke umeinander tordiert. Das nicht fluchtende Gelenk in der Schulter kann um maximal 105° aus der gestreckten Lage angewinkelt werden und verfügt über einen ausreichenden internen Bauraum, in dem das Gelenk mit Seilzügen in Bowdenzügen überbrückt werden kann. Nachteilig an dieser Lösung ist, dass bei einer Bewegung des nicht fluchtenden Gelenks, in der dieses die gestreckte Lage passiert, die Bowdenzüge ihre Krümmung ändern und daher von einer Seite auf die andere umschlagen. Dies müsste durch einen Längenausgleich der Bowdenzüge ausgeglichen werden, um eine unzulässige Krümmung der Bowdenzüge zu verhindern. Um dies zu umgehen, bietet es sich an, die Seilzüge wie im Ellbogen durch die zu überbrückende Drehachse zu leiten und diese wie eine fluchtende Drehachse zu überbrücken. Die Seilzüge können allerdings nicht durch die Lagerungen aus der Schulter herausgeführt werden, wie dies im Ellbogen der Fall ist, da diese Bereiche für die Anbringung von taktilen Sensoren benötigt werden. Sie sind daher im Inneren des Gelenks anzuordnen. Für den Antrieb beider Gelenke im Ellbogen sind vier Seilzüge in der Schulter zu verlegen. Daher können diese nicht alle coaxial zur Drehachse angeordnet werden. Stattdessen werden sie in kompakter Anordnung parallel zur Drehachse geführt. Die Seilzüge überbrücken in Bowdenzügen die erste Roll-Drehachse der Schulter und werden über Seilrollen parallel zur Drehachse des nicht fluchtenden Gelenks geleitet (Abbildung 7.3-7). Von dort überbrücken sie die Drehung des Oberarms in Bowdenzügen, mit denen sie in dem Oberarm geführt werden. Die durch eine Bewegung von Gelenk 2 entstehende Längenänderung wird von den Bowdenzügen ausgeglichen, die in einem Bogen in den Oberarm geführt werden. Diese kleine Längenänderung kommt zustande, da die Seilzüge einen Versatz zu der zu überbrückenden Drehachse von Gelenk 2 aufweisen. Die Aktoren befinden sich im Torso unterhalb des Schultergelenks. Die Seilzüge werden von dem Schultergelenk über Seilrollen zu den Aktoren geleitet. Das Übersetzungsverhältnis zwischen der vom Aktor angetriebenen Abtriebsrolle und dem Unterarm ist für den eingesetzten Servomotor nicht ausreichend. Daher wird zwischen dem Motor und der Abtriebsrolle noch ein Getriebe geschaltet, das einen rotatorischen Eingang und einen rotatorischen Ausgang aufweist und das notwendig Übersetzungsverhältnis erbringt.

Hierfür wird ein Harmonic-Drive-Getriebe¹²⁰ gewählt, das sehr gute dynamische Eigenschaften mit einem geringen Eigengewicht verbindet. Der Zusammenhang zwischen den Systemelementen im Antriebsstrang ist in Abbildung 7.3-6 dargestellt.

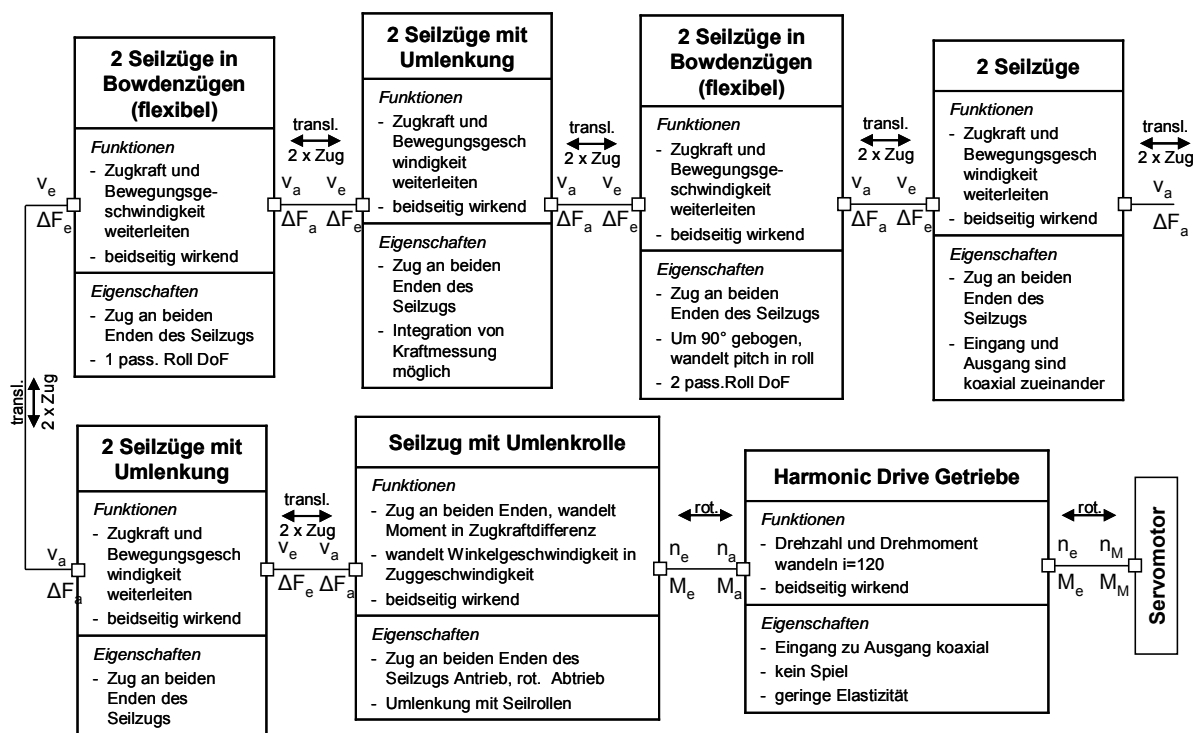


Abbildung 7.3-6: Systemelemente des Antriebsstrangs; vom Aktor für das Gelenk 5 bis zum Oberarm
 Abbildung 7.3-7 zeigt die Systemelemente des Antriebsstrangs – vom Aktor bis zum Oberarm – in einer konzeptionellen Skizze.

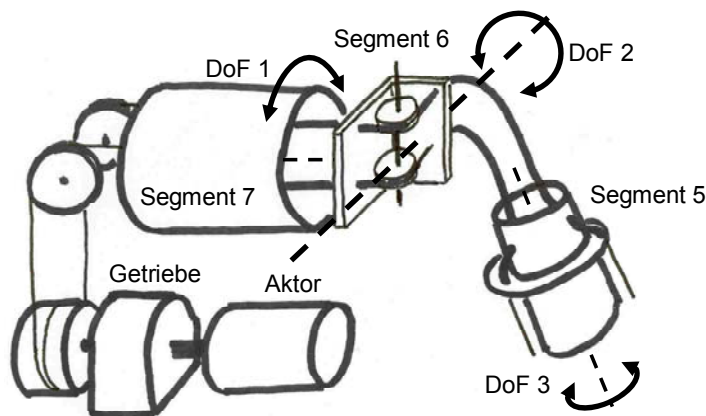


Abbildung 7.3-7: Konzept für den Antrieb von Gelenk 5; vom Aktor bis zum Oberarm

Antriebsstrang für das Gelenk 4

Es bietet sich an, den Antriebsstrang für das Gelenk 4 nach dem gleichen Prinzip wie den Antriebsstrang von Gelenk 5 durch die Schulter zu leiten. Auf das nicht fluchtende

¹²⁰ Harmonic Drive 2005/2006

Gelenk 4 wird die Antriebsleistung mit einer Seilscheibe übertragen, um die der Seilzug gewickelt ist (Abbildung 7.3-8).

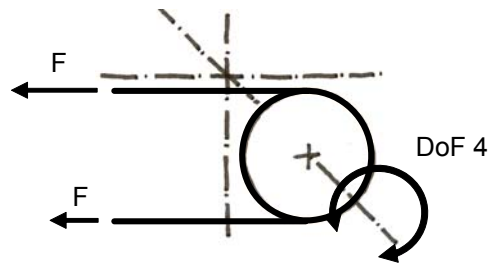


Abbildung 7.3-8: Konzept für das Segment des Antriebsstrangs am Gelenk 4

7.3.3.3 Konzeptionelle Verifikation der Aktorik

Verifikation: Winkel- und Kraftsensorkonzept

Die Winkelsensoren beider Gelenke im Ellbogen müssen eine mittige Öffnung entlang der Drehachse aufweisen, durch die im fluchtenden Gelenk die Verkabelung und im nicht fluchtenden Gelenk die Seilzüge geführt werden. Die Kraftmessung wurde bei der Auswahl der Antriebsstränge bereits mitbeachtet.

Verifikation: Gelenkrechnereinheit

Für die Gelenkrechnereinheit steht im Oberarm der Bauraum zwischen den Seilzügen zur Verfügung. Ansonsten kann der Gelenkrechner in der Schulter oder im Torso angebracht werden.

Verifikation: Tragstrukturkonzept

Das Tragstrukturkonzept, wie es in Abbildung 7.3-3 dargestellt ist, ermöglicht den Anschluss aller Systemelemente der Aktorik.

Verifikation: Schnittstelle zum Modul darüber

In die Schulter sind die Seilzüge für den Antrieb der Ellbogengelenke und die Verbindungskabel zu den Gelenkrechnern des Handgelenks und des Ellbogens zu führen.

7.3.3.4 Ergebnis des Entwurfs der Aktorik

In Abbildung 7.3-9 ist die gesamte Aktorik für den Ellbogen in einem CAD-Modell dargestellt. Die Antriebsmotoren sind an der Unterseite des Torsos angebracht, um deren Masse tief im Torso zu platzieren. Ziel ist hierbei, den Schwerpunkt des Oberkörpers möglichst nahe an die Basis zu legen, da sich dort die Drehachsen der Torsogelenke befinden.

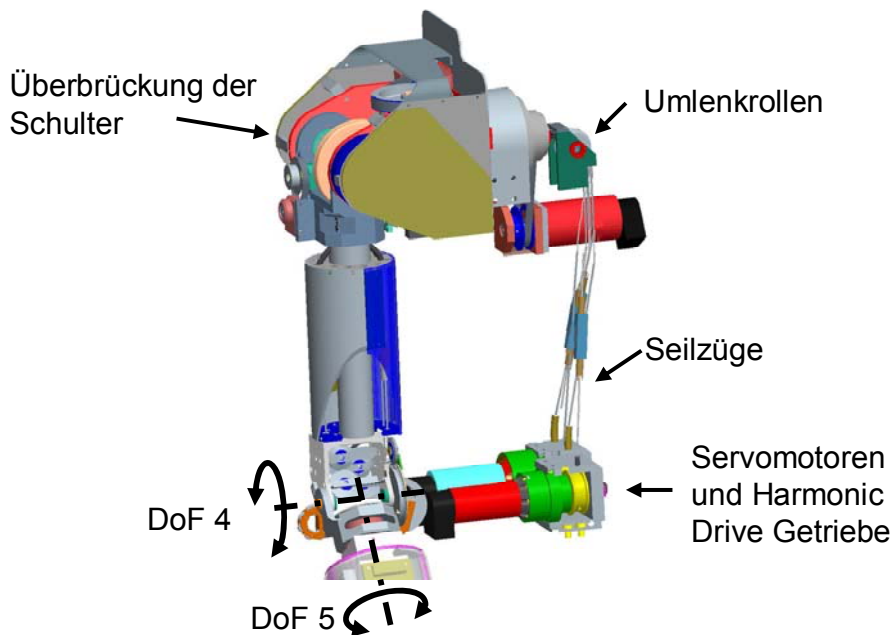


Abbildung 7.3-9: Antriebseinheiten des Gelenkkomplexes des Ellbogens, zusammen mit der in Kapitel 7.4 entworfenen Schulter (Vorgriff auf die fertige Konstruktion des Ellbogens und der Schulter)

7.3.4 Handlungsschritt: Entwurf der Sensorik

Mithilfe konzeptioneller Verifikationen des Technischen Gelenks und der Aktorik wurde sichergestellt, dass die von den Sensoren geforderten Bedingungen zu erfüllen sind. Im Folgenden werden die Sensoren entworfen. Hiernach erfolgt eine konzeptionelle Verifikation bezüglich der Funktionseinheiten, die sich in der DSM in Tabelle 4.2-4 ergeben haben.

7.3.4.1 Geschwindigkeitssensorentwurf

Als Sensoren werden Encoder eingesetzt, die vom Hersteller an den Servomotoren angebracht sind.

7.3.4.2 Kraftsensorentwurf

In den Antriebsstrang sind Systemelemente zu integrieren, mit denen die Zugkraft in den Seilzügen gemessen werden kann. Zur Bestimmung der Zugkraft ist es notwendig, ein zusätzliches Systemelement in dem Antriebsstrang einzufügen, an dem die übertragene Kraft bestimmt wird. Da Seilzüge nur eine Zugkraft übertragen und daher zwei benötigt werden, um ein Gelenk in beide Richtungen bewegen zu können, sind in beiden Seilzügen Sensoren zur Messung der Zugkraft einzusetzen (Abbildung 7.3-10). Das Moment ergibt sich aus einer Differenzmessung. Dies führt zusätzlich dazu, dass sich die Fehler aufgrund der Vorspannkraft in den Seilzügen aufheben. Für diese Messung bietet sich die Integration zweier Systemelemente an, deren Verformung durch die Zugkraft mit DMS-Streifen detektiert wird (Tabelle 5.4-5).

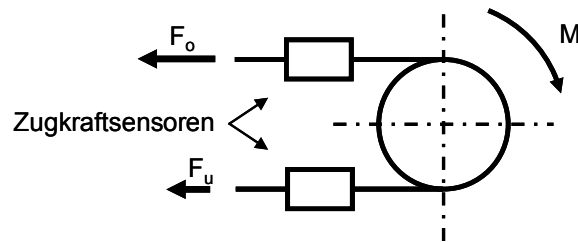


Abbildung 7.3-10: Kraftmessung am freien Seilzug, der eine Antriebsrolle umschlingt

7.3.4.3 Winkelsensorentwurf

Aufgrund des Abstandes des Ellbogengelenks zur Hand sind Winkelsensoren einzusetzen, mit denen die Position der Hand genauer im Raum zu bestimmen ist, als im Handgelenk. Es ist nachzuprüfen, ob in dem Bauraum des Ellbogengelenks die quasiabsoluten Sensoren angebracht werden können, die in Kapitel 6.3.3 für den Arm empfohlen werden.

Einbauorte für die Sensoren und Sensorauswahl

Wirklflächenpaar für das Gelenk 3, Drehung Unterarm

In Abbildung 7.3-11 sind die drei Orte in dem Gelenk gekennzeichnet, die sich für die Anbringung eines Winkelsensors eignen. Der Ort 1 bietet nur eingeschränkt Bauraum, da direkt im Anschluss an dieses Gelenk der Unterarm in ein Vierkanthrohr übergeht, in dem der Bauraum für die Aktorik des Handgelenks benötigt wird. Der Ort 2 bietet ebenfalls nicht genügend Bauraum, da dort die Seilzüge für den Antrieb des Gelenks 3 um den Unterarm gewickelt sind.

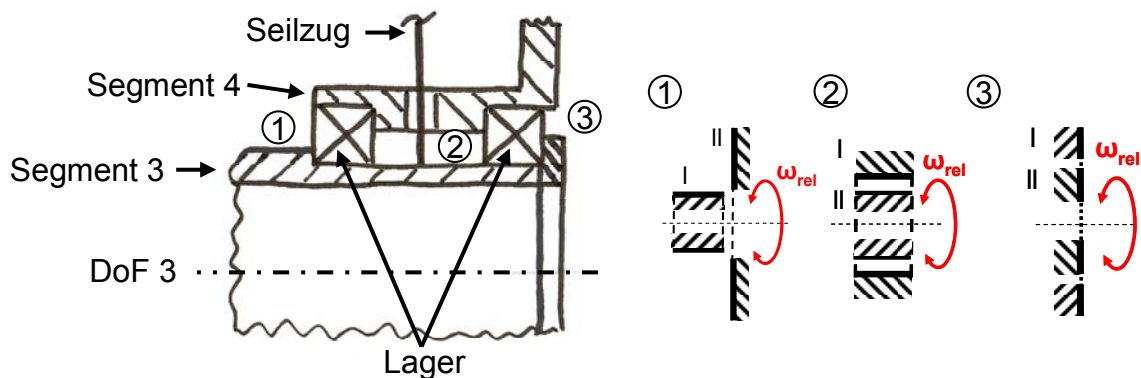


Abbildung 7.3-11: Wirklflächen für die Montage des Winkelsensors im Gelenk 5

An der Position 3 kann ein optischer quasiabsoluter Sensor angebracht werden, allerdings ist hierfür ein zusätzliches Wirklflächenpaar notwendig (Abbildung 6.3-5). Die runde Folie des Sensornebenteils hat eine mittige Öffnung und wird auf die Außenseite des Unterarmrohres aufgeklebt (Abbildung 7.3-12). Der Sensorhauptteil ist mit einer Halterung gegenüber der Folie angebracht.

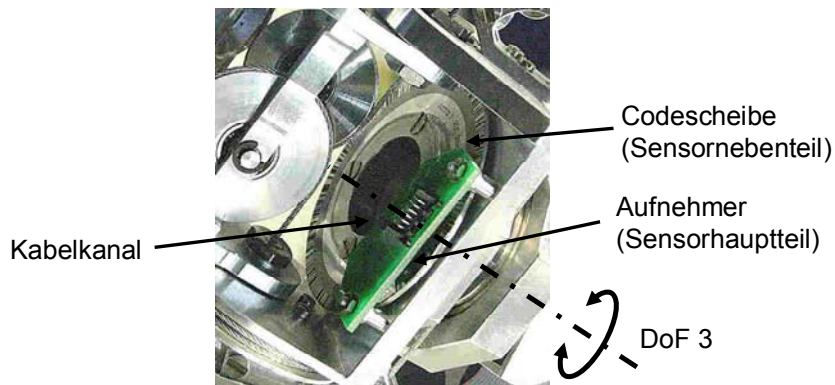


Abbildung 7.3-12: Winkelsensor des Gelenks Unterarm Drehen (DoF 3) (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

Gelenk 4, Ellbogen Beugen

Die beiden Segmente 4 und 5 sind über ein nicht fluchtendes Gelenk miteinander verbunden. An diesen Segmenten existieren mehrere Wirkflächen, die sich für die Anbringung von Sensoren eignen. In Abbildung 7.3-13 ist das Gelenk schematisch, mit Blick von oben dargestellt.

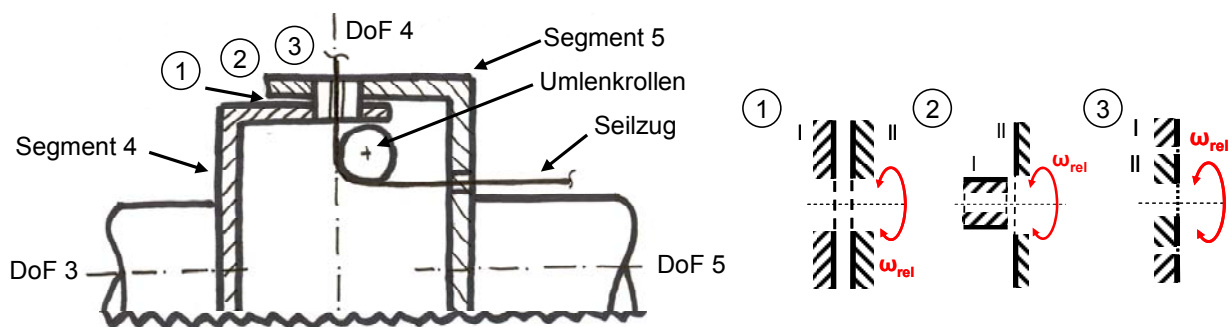


Abbildung 7.3-13: Wirkflächen für die Montage des Winkelsensors im Gelenk 6

Es ist nur eine Hälfte des Gelenks abgebildet, da die andere dazu symmetrisch ist. Die gekennzeichneten Stellen 1 und 2 würden sich für eine Anbringung der gewünschten optischen Sensoren nur durch eine Vergrößerung der Tragstruktursegmente eignen. Am Ort 3 ist für einen optischen Drehwinkelsensor (Abbildung 6.3-5) noch ein weiteres Wirkflächenpaar anzubringen, um zwei sich gegenüberliegende, zueinander rotierende Flächen zu erhalten. Um dies zu ermöglichen, müssen sich das Segment 5 und die Welle relativ zueinander bewegen. Daher ist die Lagerungsfunktion zwischen beiden zu realisieren. Durch diesen Sensor kann der Seilzug, der entlang der Drehachse verläuft, geführt werden. Das Sensornebenteil wird auf eine Halterung aufgeklebt, die starr mit der Welle verbunden ist. Der Sensorhauptteil ist über eine Halterung mit dem Segment 5 verbunden. Dies ist in Abbildung 7.3-14 dargestellt.

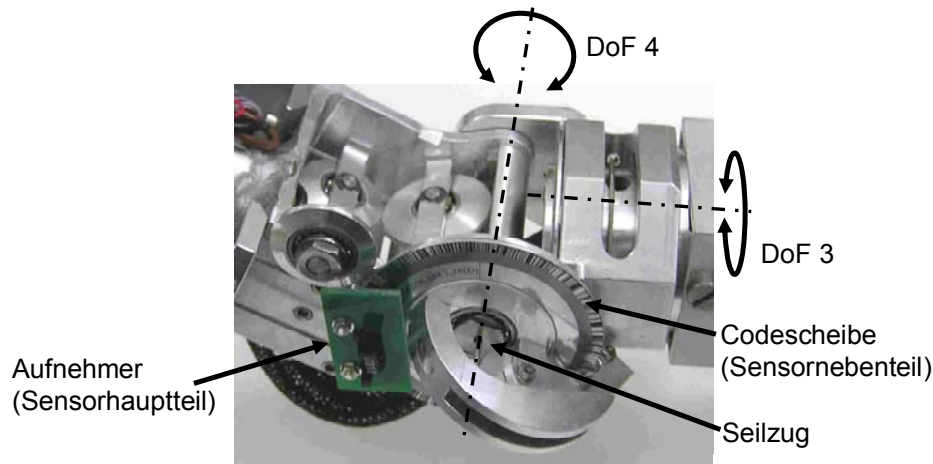


Abbildung 7.3-14: Winkelsensor, Beugen Ellbogen (DoF 4) (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

7.3.4.4 Konzeptionelle Verifikation der Sensorik

Die analogen Signale der Kraftmessung und die digitalen Signale der Winkelmessungen können in vom Gelenkrechner zu verwendende Signale gewandelt werden. Die Sensoren sind mit der Tragstruktur kompatibel.

7.3.5 Handlungsschritt: Entwurf der Gelenkrechner und der Tragstruktur

Am Rand des Oberarmrohrs, unter der Verkleidung, ist nicht genug Bauraum vorhanden, um die Gelenkrechner für das Ellbogengelenk und für das Handgelenk zu integrieren. Auch im Oberarm könnten sie aufgrund ihrer Größe nur zentral angebracht werden, wofür die Tragstruktur eine mittige Öffnung benötigt. Dies schwächt die Struktur des runden Hohlprofils. Daher sind die Gelenkrechner an einem übergeordneten Segment anzubringen. Da die beiden Aktoren des Ellbogengelenks, inklusive der daran angebrachten Encoder, in den Torso ausgelagert sind, bietet es sich an, die Gelenkrechnereinheit für den Ellbogen ebenfalls in den Torso auszulagern. Die Winkelsensoren am Ellbogen und die Kraftsensoren im Oberarm sind über Kabel mit den Gelenkrechnern zu verbinden. Die Gelenkrechner des Handgelenks können an der Schulter angebracht oder ebenfalls in den Torso ausgelagert werden.

Die endgültige Tragstruktur des Ellbogengelenks entspricht dem prinzipiellen Aufbau des Konzepts aus Abbildung 7.3-3.

7.3.6 Ergebnis aus dem Systementwurf des Teilsystems des Ellbogengelenks

Abbildung 7.3-15 zeigt Fotos vom fertigen Roboter, auf denen die Ergebnisse des Entwurfs des Gelenkkomplexes des Ellbogens abgebildet sind. Links ist das Gelenk des Ellbogens dargestellt, darunter die Seilzugführung im Ellbogen und die Seilrollen

in der Schulter, mit denen die Seilzüge in den Torso nach unten geleitet werden. Auf der rechten Seite sind die Antriebseinheiten im Torso des Roboters zu erkennen.

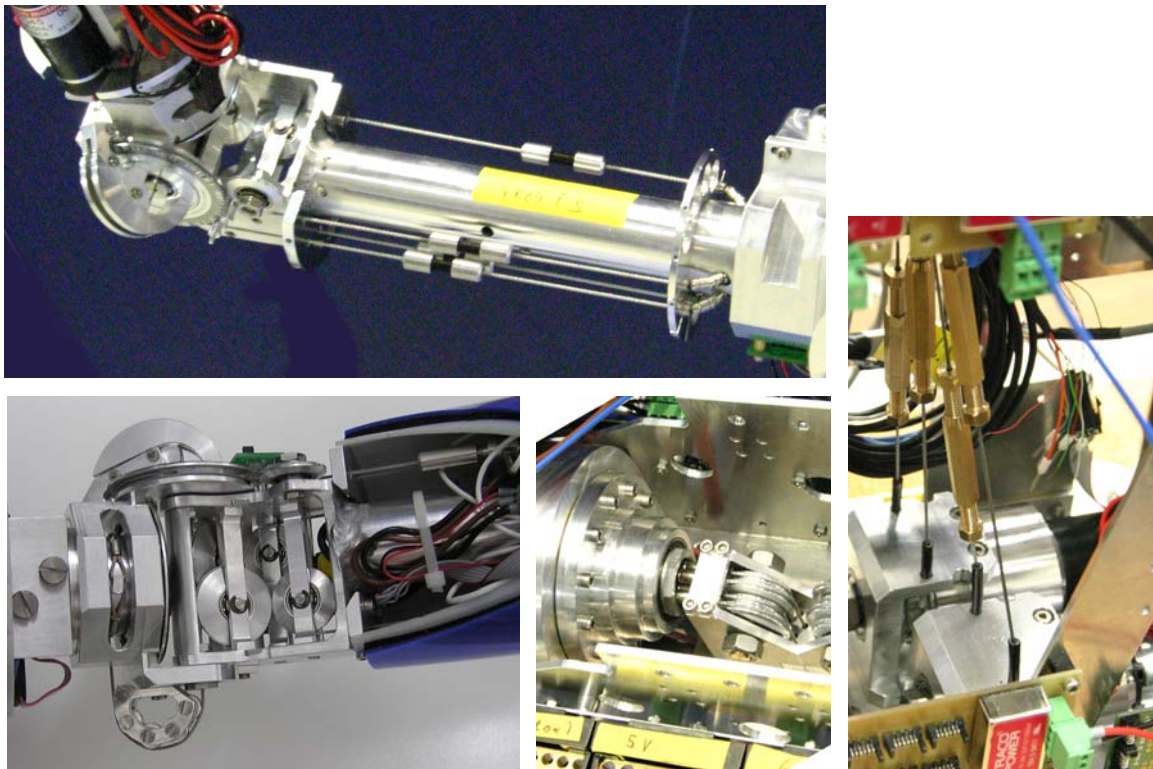


Abbildung 7.3-15: Ergebnis des Entwurfs des Ellbogengelenks (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

7.4 Prozessabschnitt: Systementwurf Gelenkkomplex Schultergelenk

In diesem Kapitel wird der Prozessabschnitt für den Systementwurf von Teilsystemen (Abbildung 7.1-1) auf den Entwurf des Gelenkkomplexes des Schultergelenks angewandt.

7.4.1 Anforderungen an das Schultergelenk

Im Folgenden werden die allgemeinen Anforderungen an den Arm auf die Gelenkkomplexe der Schulter abgebildet.

Übergeordnete Bedingungen

Komponenten, die einen großen Beitrag zur Gesamtmasse der Schulter leisten, sind nahe der Drehachsen anzubringen, um die Drehmasse möglichst gering zu halten. Die Schulter ist auf der Vorder- und Rückseite mit einer taktilen Haut zu versehen. Diese ermöglicht es, den Roboter durch eine Berührung an der Schulter in die gewünschte Richtung zu dirigieren.

Bauraum

Der Bauraum im Torso des Roboters, der für die Schulter und die Antriebe des Ellbogens zu Verfügung steht, ist in Abbildung 6.1-2 dargestellt. Die Drehachsen der

Schulterbeugebewegung beider Schultern sind 480 mm voneinander entfernt. Die Basis des Halsgelenks befindet sich zwischen den beiden Schultergelenken auf der Oberseite des Torsos.

Schnittstelle zum untergeordneten Gelenkkomplex (Ellbogengelenk)

Der Arm unterhalb der Schulter, inklusive der Hand, wiegt 2,5 kg, und der Schwerpunkt befindet sich ein Stück vor dem Ellbogengelenk, in Richtung des Handgelenks. Durch die Schulter und damit durch beide Schnittstellen des Schultergelenks werden die Seilzüge für den Antrieb des Ellbogens (Abbildung 7.3-7), eine Bus-Leitung, der Anschluss der Spannungsquelle und die Druckluftversorgung für die Hand geführt. Weiterhin verlaufen die Verbindungsleitungen der Winkelsensoren des Ellbogens zu dem zugehörigen Gelenkrechner durch die Schulter.

Technisches Mehrfachgelenk

Das Mehrfachgelenk beinhaltet die drei Drehachsen Roll, Pitch und Roll, die sich in einem Punkt schneiden. Der am Körper herabhängende Arm kann um 45° nach hinten und um 180° nach vorne geschwenkt werden. Weiterhin kann er um 15° nach innen und 180° nach außen gehoben werden (Abbildung 6.2-9). Die Oberarmdrehung ermöglicht, ausgehend von der Nullposition, eine Beweglichkeit um +/-150°. Alle Gelenke in der Schulter müssen über einen internen Durchgang für die Seilzüge zum Ellbogen und für die elektrischen Leitungen verfügen.

Aktorik

Um 3 kg statisch in der Hand zu halten und um 1 kg in einer Sekunde um 90° von Stillstand zu Stillstand zu bewegen, werden in der ersten Abschätzung 15 Nm Drehmoment für das Drehen des Oberarms sowie 35 Nm Drehmoment in der Beugeachse und der Schwenkachse der Schulter benötigt. Vom Antrieb werden die in Kapitel 6.3.2 aufgeführten Punkte gefordert. Bei einer Unterbrechung der Antriebsleistung oder einem Systemausfall darf dem Menschen keine Gefahr durch einen schnell herabsinkenden Arm entstehen. Das Antriebsmoment ist möglichst spielfrei, bei einer geringen Elastizität des Antriebsstrangs, zu übertragen.

Sensorik, Messung des Antriebsmoments und des Gelenkwinkels

Jedes Gelenk ist mit einer Geschwindigkeits-, einer Winkel- und einer Momentenmessung zu versehen.

Gelenkrechner

Als Gelenkrechner ist ein UCoM inklusive einer Leistungseinheit einzusetzen (Kapitel 6.4). Im Roboter ist ein Ort für den Gelenkrechner auszuwählen, zu dem die elektronischen Verbindungsleitungen zu führen sind.

Tragstruktur

Das Schultergelenk kann in Anlehnung an den Menschen ein großes Volumen einnehmen, sollte aber dadurch nicht zu „muskulös“ wirken.

7.4.1.1 Modell des Gelenkkomplexes Schultergelenk

In Abbildung 7.4-1 sind die Funktionseinheiten und Systemelemente dargestellt, die im Gelenkkomplex der Schulter integriert sind. Dieses Diagramm trifft noch keine Aussage über die physikalische Integration dieser Anteile.

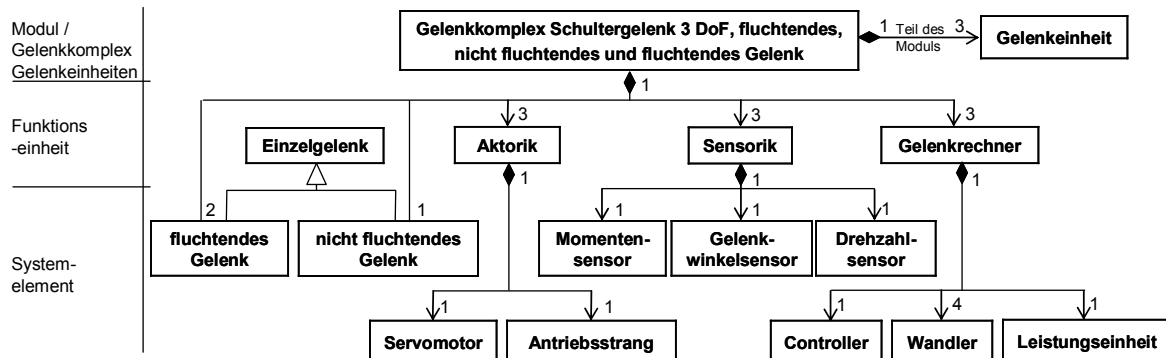


Abbildung 7.4-1: Klassendiagramm Schultergelenk

7.4.2 Handlungsschritt: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks

Im Mehrfachgelenk der Schulter schneiden sich die Drehachsen von zwei fluchtenden Gelenken, zwischen denen sich ein nicht fluchtendes Gelenk befindet, senkrecht in einem Punkt (Abbildung 7.4-2).

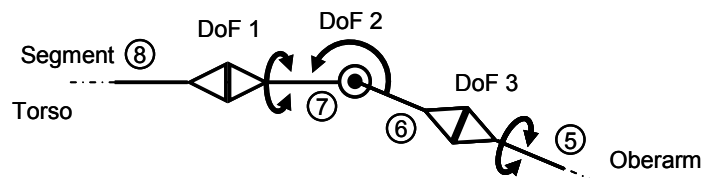


Abbildung 7.4-2: Anordnung der Drehachsen im Schultergelenk

7.4.2.1 Konzeptionelle Verifikation des Technischen Mehrfachgelenks

Die Funktionseinheiten, die bezüglich des Technischen Mehrfachgelenks zu verifizieren sind, haben sich in der DSM in Tabelle 4.2-4 ergeben.

Verifikation: Antriebskonzept – Sensor Antriebsmoment

Aufgrund des Bauraums, der in der Schulter und im Torso vorhanden ist, können die Aktoren auf vielfältige Weise am Mehrfachgelenk oder im Torso angebracht werden.

Verifikation: Winkelsensorkonzept

An den Gelenken steht ausreichend Bauraum für die Integration von Winkelsensoren zur Verfügung.

Verifikation: Integration der Gelenkrechner

Für die Gelenkrechner ist ebenfalls ausreichend Bauraum vorhanden. Die Verkabelung, die zu den Gelenkrechnern über die Grenzen des Gelenkkomplexes der Schulter zu führen ist, muss vor einer Beschädigung durch die Seilzüge des Ellbogens geschützt werden.

Verifikation: Tragstrukturen im und am Technischen Gelenk

Die Lagerungen der drei Gelenke sind in Bezug auf den Bauraum problemlos mit Tragstrukturen zu verbinden, da durch die Kinematik nicht vorgegeben ist, wie weit die Gelenke räumlich voneinander entfernt sind. Für alle Drehachsen existieren Technische Gelenke, die in dieser Reihenfolge miteinander kombinierbar sind (Kapitel 5.2.2).

7.4.2.2 Ergebnis des Entwurfs des Technischen Mehrfachgelenks

Der Arm ist mit einem fluchtenden Gelenk im Segment 8, das zum Torso gehört, gelagert. Das Segment 8 umschließt das Segment 7, da dies die Montage im Körper vereinfacht und die Drehmasse bei dieser Roll-Bewegung verringert. Der Antrieb dieses Gelenks erfolgt aus dem Torso heraus. Das Segment 7 umschließt das Segment 6 und beide bilden zusammen das nicht fluchtende Gelenk 2. Diese Konstellation weist eine geringere Drehmasse auf und ermöglicht die Anbringung einer Schulterverkleidung, die sich beim Strecken des Arms nicht mitbewegt. Das Hohlrohr des Oberarms (Segment 5) ist über ein fluchtendes Gelenk mit dem Segment 6 verbunden. Um die Aktorik und die Sensorik dieses Gelenks von dessen Bewegung zu entkoppeln, ist das Segment 6 über den Oberarm gezogen, wodurch sich Montageflächen für die Sensoren und den Antrieb ergeben. Dieses Mehrfachgelenk ist in Abbildung 7.4-3 dargestellt und entspricht der in Abbildung 5.2-18 aufgrund seiner Massenverteilung hervorgehobenen Variante.

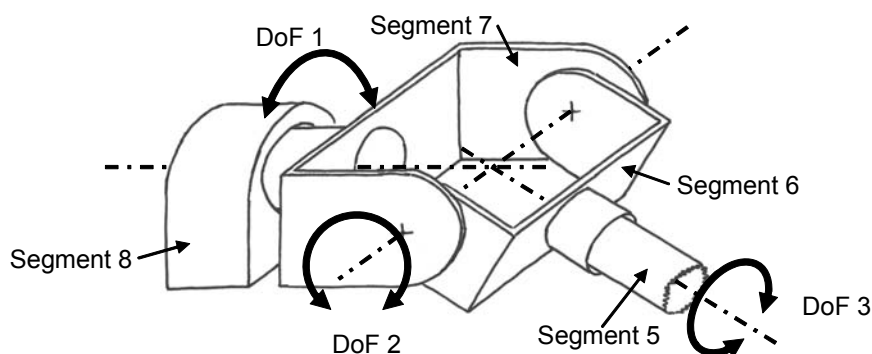


Abbildung 7.4-3: Entwurf des Technischen Mehrfachgelenks der Schulter

7.4.3 Handlungsschritt: Entwurf der Aktorik

Zuerst werden im Entwurf der Aktorik die Orte im Mehrkörpersystem bestimmt, an denen der Aktor angebracht werden kann. Im nächsten Schritt wird abgeklärt, ob

Systemelemente des Antriebsstrangs existieren, mit denen der Aktor an der jeweiligen Position prinzipiell mit dem Gelenk verbunden werden kann. Hiernach wird ein Standort für den Aktor ausgewählt und der Antriebsstrang aus Systemelementen kombiniert, die zusammen die gewünschten Eigenschaften und Funktionen erfüllen. Hiernach findet eine konzeptionelle Verifikation des Antriebsstrangs bezüglich der Funktionseinheiten statt, die sich in der DSM Tabelle 4.2-4 ergeben haben. Am Ende dieses Kapitels wird das Ergebnis dieses Entwurfs vorgestellt.

Bei den in den drei Drehachsen der Schulter aufzubringenden Momenten handelt es sich aufgrund des Hebelarms zur Hand um die größten im gesamten Arm. Für den Entwurf der Aktorik gelten die Voraussetzungen aus Kapitel 6.3.2.

7.4.3.1 Standort für die Aktoren

Orte im Mehrkörpersystem für den Aktor des Gelenks 3

1. Fall: 0 überbrückte Gelenke

Das Oberarmrohr ist für die Kabel und die Seilzüge des Ellbogengelenks intern frei zu halten. Somit ist der Antrieb des fluchtenden Gelenks 3 neben dem Oberarmrohr zu platzieren. Für eine günstige Massenverteilung ist der Aktor nahe an der darüber liegenden Drehachse 2 anzubringen. Der Antrieb sollte nicht im Inneren des Gelenkkomplexes angebracht werden, da ansonsten aufgrund der Bewegungen von Gelenk 2 für diesen ein großer Raum in der Schulter frei zu halten wäre.

2. Fall: 1 überbrücktes Gelenk

Der Antrieb wird im Inneren von Segment 7 angebracht, da außerhalb aufgrund der anthropomorphen Form der Schulter und aufgrund der Verkleidung kein Bauraum vorhanden ist. Für die Überbrückung der Pitch-Drehachse von Gelenk 2, mit einem Bewegungsbereich zwischen -105° und 90° (Gelenk 2), ist es notwendig, einen flexiblen Antriebsstrang einzusetzen oder das Gelenk entlang der Drehachse mit einem passiven Roll-Gelenk zu überbrücken (Kapitel 5.3.3). Ein flexibler Antriebsstrang benötigt zusätzliche Systemelemente, mit denen die Antriebsleistung von dem Antriebsstrang zum Gelenk übertragen wird. Eine Überbrückung entlang der Drehachse des nicht fluchtenden Gelenks scheidet aus, da sich an dieser Stelle die Bowdenzüge für den Antrieb des Ellbogengelenks befinden.

3. Fall: 2 überbrückte Gelenke

Der Antriebsstrang überbrückt die Gelenke 1 und 2 in der Schulter und wird von einem Servomotor aus dem Torso heraus angetrieben. Aufgrund des großen Bewegungsraums der zu überbrückenden Gelenke ist es notwendig, einen flexiblen Antriebsstrang einzusetzen, der durch die Gelenke geführt wird.

Orte im Mehrkörpersystem für den Aktor des Gelenks 2

1. Fall: 0 überbrückte Gelenke

Der Motor ist neben dem Gelenk innerhalb des Segments 7 angebracht. Der Antrieb ist kompakt in die Schulter, nahe der Drehachse von Gelenk 1, zu integrieren.

2. Fall: 1 überbrücktes Gelenk

Der Aktor ist in den Torso ausgelagert, und der Antriebsstrang überbrückt das fluchtende Gelenk 1. Hierfür ist ein flexibler Antriebsstrang einzusetzen, der zusammen mit den Bowdenzügen des Ellbogens das Roll-Gelenk überbrückt. Ein starres Segment des Antriebsstrangs mit einem passiven Roll-Gelenk kann hier nicht genutzt werden, da der dafür notwendige Bauraum entlang der Roll-Drehachse von den Bowdenzügen des Ellbogengelenks benötigt wird.

Orte im Mehrkörpersystem für den Aktor des Gelenks 1

Der Antrieb für dieses Gelenk befindet sich im Torso und muss daher nicht über einen Freiheitsgrad hinweg übertragen werden.

Mögliche Orte für die Aktoren

Aufgrund der Nähe der Schulter zur Basis des Arms ist eine deutliche Verringerung der Drehmassen durch eine Auslagerung der Aktoren in den Torso nicht zu erreichen. Daher ist es anzustreben, die Aktoren neben dem anzutreibenden Gelenk nahe den übergeordneten Drehachsen anzubringen.

Der Aktor für die Drehung des Oberarms (Gelenk 3) wird ohne Überbrückung einer Drehachse, aufgrund des dort vorhandenen Bauraums und der örtlichen Nähe zu den Drehachsen 1 und 2, am Segment 6 angebracht. Der Aktor des nicht fluchtenden Gelenks ist im Inneren des Gelenks an Segment 7 anzubringen, und für den Aktor des Gelenks 1 befindet sich ausreichend Bauraum im Torso. Alle drei Antriebsstränge müssen eine ausreichende Übersetzung aufweisen und die Integration einer Kraftmessung ermöglichen.

7.4.3.2 Systemelemente Antriebsstrang

Räumliche Bedingungen für den Entwurf des Antriebsstrangs

In Abbildung 7.4-4 ist – von oben betrachtet – schematisch der mögliche Bauraum für die drei Antriebe in der Schulter mit gestrichelten Vierecken gekennzeichnet, die sich zum Teil überschneiden. Nicht gekennzeichnet ist der Raum in der Schulter, der für die Bowdenzüge frei bleiben muss.

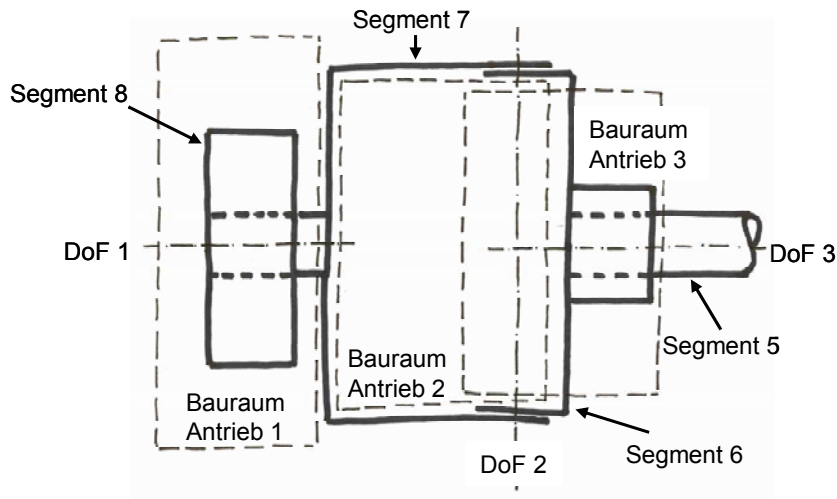


Abbildung 7.4-4: Bauraum für die Antriebe im Schultergelenk

Antriebsstrang für das Gelenk 3

Der Antrieb für das Gelenk 3 soll nahe den Drehachsen von Gelenk 2 und 1 an dem Segment 6 angebracht werden. Der Antriebsstrang muss einen seitlichen Versatz zu dem Hohlrohr des Oberarms ermöglichen, darf den Zugang zum Oberarmrohr (Segment 5) nicht versperren und muss eine Kraftmessung ermöglichen. Der Bauraum am Segment 6 kann am besten ausgenutzt werden, wenn der Aktor orthogonal zur Abtriebsachse angeordnet ist. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 7.4-5 dargestellt. Die gewünschte Funktionalität ist aufgrund des schmalen Bauraums neben dem Oberarmrohr durch eine Kombination von möglichst wenigen, kleinen und leichten Systemelementen zu generieren. Unter den zur Auswahl stehenden Systemelementen des Antriebsstrangs, bei denen der Abtrieb orthogonal zum Antrieb ausgerichtet ist, verfügt nur ein Schneckenradgetriebe über eine mittlere bis große Übersetzung und über die Möglichkeit zur Integration einer Kraftmessung (Anhang, Tabelle 11.2-1). Die Kraftmessung findet dabei an einer externen Stelle statt, an der die Axialkraft bestimmt wird, mit der sich die Schnecke am Gehäuse abstützt. Das Schneckenrad kann als Hohlrad ausgeführt werden, was den Zugang zum Oberarmrohr frei hält.

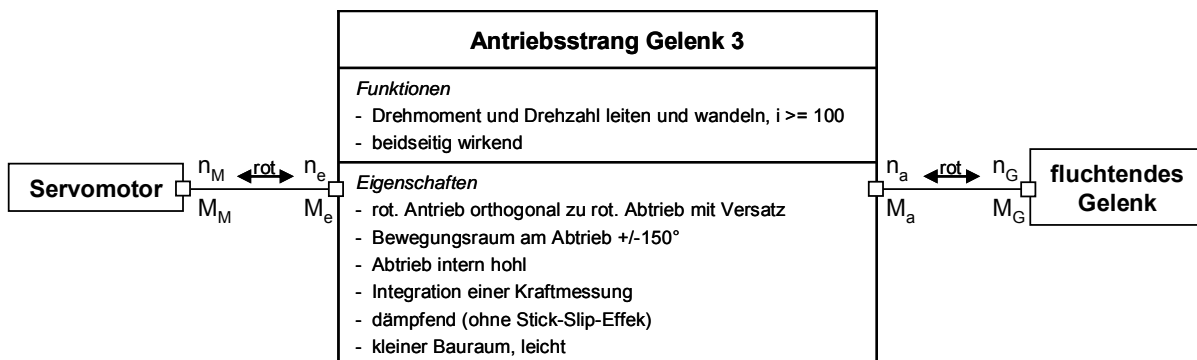


Abbildung 7.4-5: Antriebsstrang für das Gelenk 3

Um den Stick-Slip-Effekt im Schneckenradgetriebe auszuschließen, darf die Übersetzungsstufe nicht selbsthemmend sein, was durch die Steigung der Verzahnung im Schneckenrad bedingt wird und daher zu einer maximalen Übersetzung bei einem bestimmten Modul und bestimmten Zahnradurchmessern führt. Das Systemelement des Antriebsstrangs, mit dem das Moment auf die Schnecke übertragen wird, darf keine zusätzliche Axialkraft auf die Schnecke ausüben, da dies die Kraftmessung verfälschen würde. Um dies zu gewährleisten, wird der Antriebsmotor mit Versatz zur Schnecke angebracht und überträgt die Antriebsleistung über einen Zahnriemen, der keine Axialkräfte weiterleitet. Der Zahnriemen ermöglicht eine weitere Übersetzung. Der Zusammenhang zwischen den Systemelementen im Antriebsstrang ist in Abbildung 7.4-6 zu erkennen.

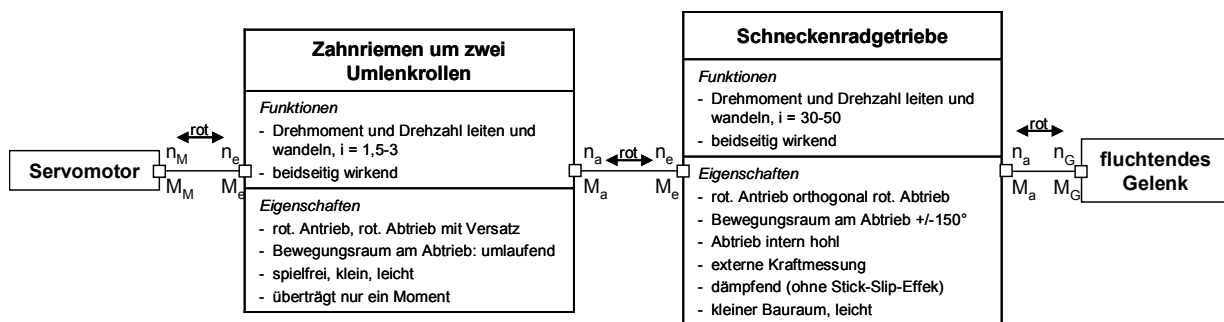


Abbildung 7.4-6: Systemelemente des Antriebsstrangs für das Gelenk 3

In Abbildung 7.4-7 ist das Konzept des gesamten Antriebsstrangs schematisch dargestellt.

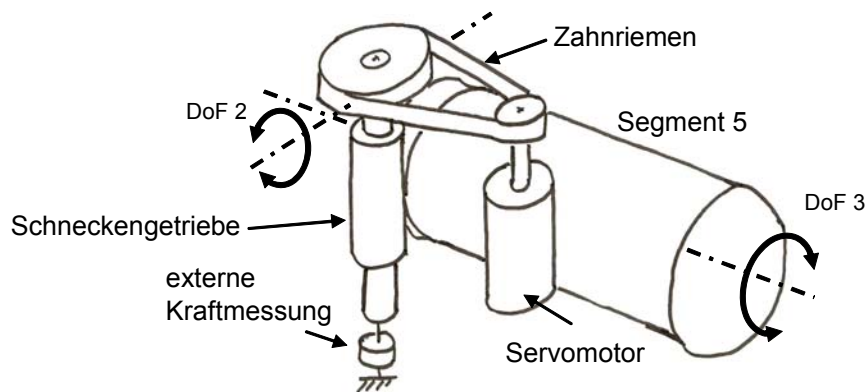


Abbildung 7.4-7: Konzept für den Antrieb des Gelenks 3

Antriebsstrang für das Gelenk 2

Der Aktor ist nahe der Drehachse 1 im Inneren von Segment 7 anzubringen. Der Aktor muss mit ausreichend großem Versatz zu der angetriebenen Drehachse 2 in der Schulter montiert werden, um nicht mit dem Segment 6 zu kollidieren, das einen großen Bauraum aufgrund des Bewegungsraums (195°) benötigt. Der Aktor kann parallel oder orthogonal zur Drehachse ausgerichtet sein. Die Funktionen und Eigenschaften des Antriebsstrangs sind in Abbildung 7.4-8 dargestellt.

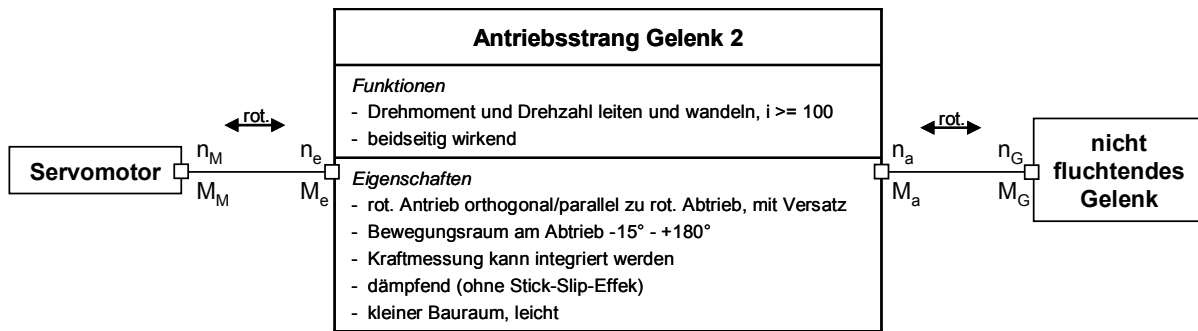


Abbildung 7.4-8: Antriebsstrang für das Gelenk 2

Unter den Systemelementen des Antriebsstrangs, die in der Tabelle 11.2-1 im Anhang aufgeführt sind und einen Versatz zum Abtrieb aufweisen, verfügt nur ein Schneckenradgetriebe über die geforderten Eigenschaften. Alle weiteren Systemelemente, die eine große Übersetzung aufweisen, sind entweder zu groß, um in der Schulter eingebaut zu werden, oder bieten nicht die Möglichkeit einer Kraftmessung. Um auf ein zusätzliches Systemelement für die Kraftmessung verzichten zu können, wird für das Gelenk 2 der prinzipiell gleiche Antriebsstrang wie für Gelenk 3 genutzt. Der Zusammenhang zwischen den Systemelementen im Antriebsstrang ist in Abbildung 7.4-9 dargestellt.

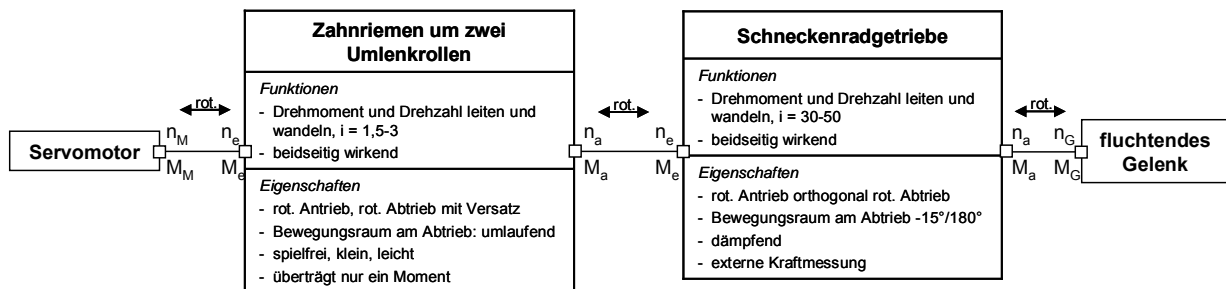


Abbildung 7.4-9: Systemelemente des Antriebsstrangs für das Gelenk 2

Abbildung 7.4-10 zeigt das Konzept des Antriebsstrangs von Gelenk 2.

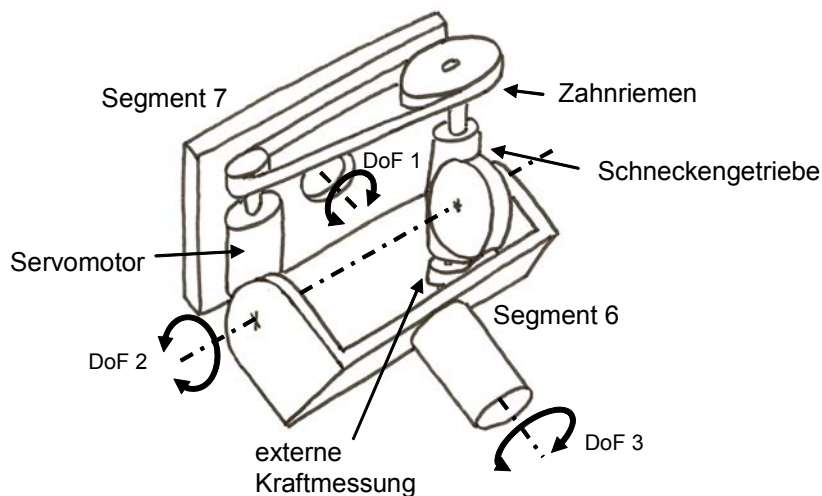


Abbildung 7.4-10: Konzept für den Antrieb des Gelenks 2'

Antriebsstrang für das Gelenk 1

Durch das Gelenk 1 werden die Bowdenzüge für den Antrieb der beiden Gelenke des Ellbogens geführt. An der Rückseite des Gelenks werden die Seilzüge über Seilrollen im Torso nach unten zu den Antrieben geleitet. Der Antriebsstrang muss eine ausreichend große Übersetzung enthalten und die Möglichkeit für eine Kraftmessung gewährleisten (Abbildung 7.4-11).

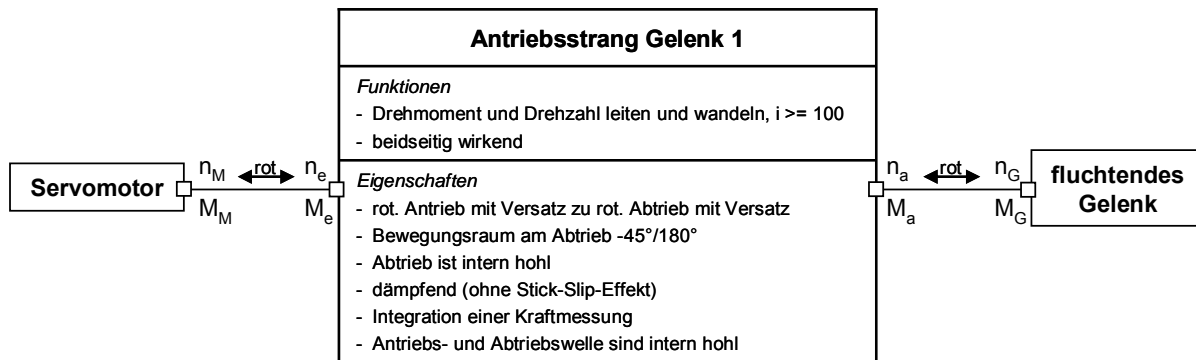


Abbildung 7.4-11: Antriebsstrang für das Gelenk 1

Der Antriebsstrang weist entlang der Drehachse einen Durchgang auf, durch den die Bowdenzüge in den Torso geleitet werden. Das fluchtende Gelenk 1 überbrücken die Bowdenzüge, indem sie entlang der Drehachse umeinander tordieren. Eine spezielle Form eines Harmonic-Drive-Getriebes, das koaxial zur Drehachse anzubringen ist, weist einen internen Durchgang auf, ist spielfrei und verfügt über eine große Übersetzung. Anzutreiben ist das Getriebe von einem Systemelement, das einen Versatz zum Antriebsmotor unterhalb der Schulter ermöglicht und ebenfalls spielfrei ist. Hierfür wird ein Zahnriemen eingesetzt, der zusätzlich über ein geringes Eigengewicht verfügt. Die Synchronscheibe, über welche das Harmonic-Drive-Getriebe angetrieben wird, ist mit einer internen Bohrung für die Bowdenzüge zu versehen. Bisher ist kein Systemelement enthalten, an dem eine Kraftmessung durchgeführt werden kann, die den Ansprüchen genügt. Diese Messung ist nach Möglichkeit auf der Seite der Übersetzung mit dem größeren Antriebsmoment durchzuführen. Daher ist das Harmonic-Drive-Getriebe über ein weiteres Systemelement mit dem Abtrieb zu verbinden, an dem solch eine Messung durchgeführt werden kann. Das Harmonic-Drive-Getriebe überträgt nur das zu messende Antriebsmoment und keine Querkräfte. Daher ist das Systemelement, welches zwischen dem Harmonic-Drive-Getriebe und dem anzutreibenden Segment angebracht ist, von diesen Querkräften zu entkoppeln. Als Systemelement wird eine Hohlwelle eingesetzt, durch welche die Bowdenzüge geführt werden können und an dem eine interne Kraftmessung durchgeführt werden kann (Anhang, Tabelle 11.2-1). Die Entkopplung von den Querkräften erfolgt über eine zur Übertragung des Antriebsmoments separaten Lagerung des fluchtenden Gelenks. Die Zusammenhänge zwischen den Systemelementen im Antriebsstrang sind in

Abbildung 7.4-12 dargestellt und das Konzept des gesamten Antriebsstrangs in Abbildung 7.4-13.

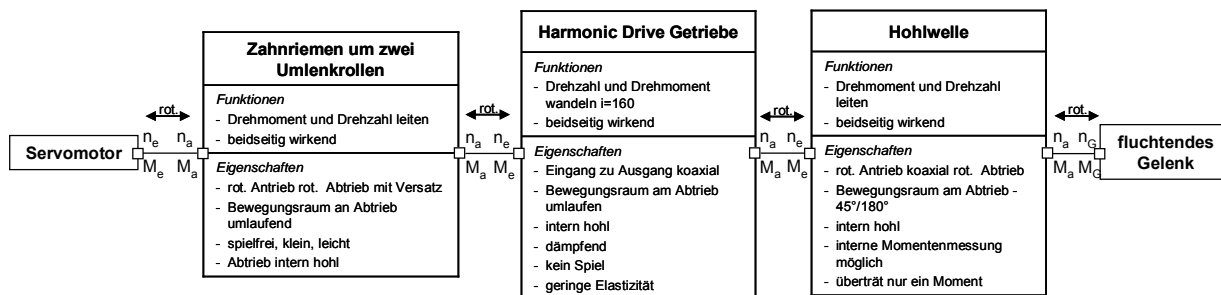


Abbildung 7.4-12: Systemelemente des Antriebsstrangs für das Gelenk 1

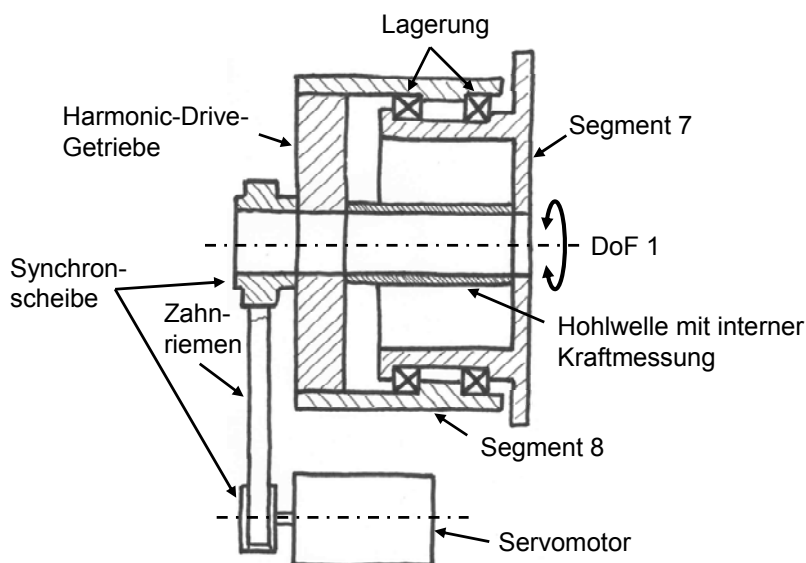


Abbildung 7.4-13: Konzept für den Antrieb des Gelenks 1

7.4.3.3 Konzeptionelle Verifikation der Aktorik

Verifikation: Winkel- und Kraftsensorkonzept

In allen drei Gelenken in der Schulter befinden sich Wirkflächen, die sich für die Anbringung von Winkelsensoren eignen und dafür ausreichend Bauraum bereitstellen. Eine Kraft- bzw. Momentenmessung wurde in der Konzeption aller drei Antriebsstränge berücksichtigt.

Verifikation: Gelenkrechnereinheit

Innerhalb des Gelenkkomplexes der Schulter ist es aufgrund der Abmessungen der Tragstruktur möglich, die Gelenkrechner anzubringen. Problematisch ist die Verkabelung, mit der die Gelenkrechner an die Sensoren und Aktoren angeschlossen werden, da sich in deren Bauraum ebenfalls die Bowdenzüge befinden, die bei einer Bewegung von Gelenk 1 umeinander tordieren, was zu einer Beschädigung der parallel dazu verlaufenden elektrischen Kabel führen kann. Daher sind die Kabel mit ausreichend Abstand zu den Bowdenzügen zu verlegen.

Verifikation: Tragstrukturkonzept

Beim Entwurf der Aktorik wurde die Tragstruktur, so wie sie in Abbildung 7.4-3 dargestellt ist, berücksichtigt.

7.4.3.4 Ergebnis des Entwurfs der Aktorik

In Abbildung 7.4-14 ist die gesamte Aktorik des Schultergelenks in einer CAD-Zeichnung abgebildet. Ein seitliches Systemelement der Tragstruktur ist für eine bessere Darstellung ausgeblendet.

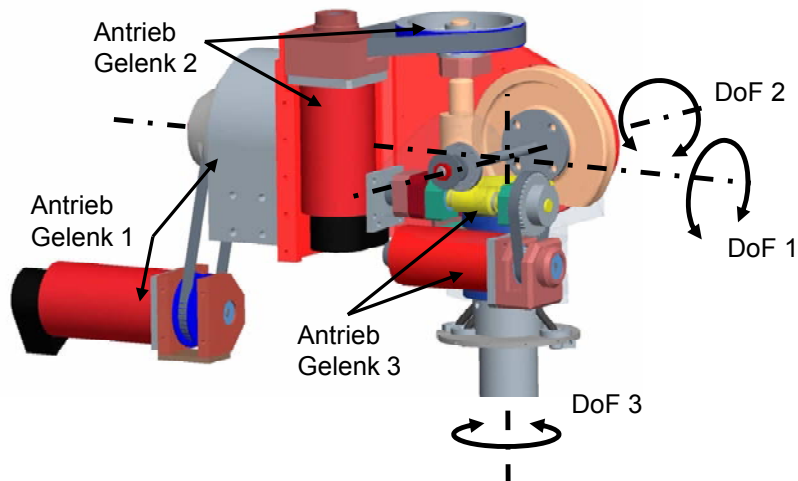


Abbildung 7.4-14: Aktorik des Schultergelenks mit drei Drehachsen; eine Seitenwand der Schulter ist ausgeblendet (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

7.4.4 Handlungsschritt: Entwurf der Sensorik

Mithilfe konzeptioneller Verifikationen des Technischen Gelenks und der Aktorik wurde sichergestellt, dass die von den Sensoren benötigten Bedingungen vorhanden sind. Im Folgenden werden die Sensoren entworfen. Hiernach erfolgt eine konzeptionelle Verifikation bezüglich der Funktionseinheiten, die sich in der DSM in Tabelle 4.2-4 ergeben haben.

7.4.4.1 Geschwindigkeitssensorentwurf

Als Sensoren werden Encoder eingesetzt, die vom Hersteller an den Servomotoren angebracht sind.

7.4.4.2 Kraftsensorentwurf

Das Antriebsmoment der Gelenke 3 und 2 wird nach dem gleichen Prinzip gemessen, da beide über eine Schneckenradverzahnung angetrieben werden. Die Axialkraft, die an der Schnecke anliegt, ist ein Maß für das Moment am Schneckenrad. Konstruktiv ist dafür zu sorgen, dass über den Antrieb und die Lagerung der Schnecke nur ein Moment übertragen wird und keine Axialkraft. Dies ist bei einer Zahnriemenverbindung der Fall, die den Antriebsmotor mit der Schnecke verbindet, und einer Lagerung der

Schnecke mit Radiallagern. Die Axialkraft in der Schnecke wird über einen Sensor in das Gehäuse gleitet. Der Sensor ist mit einer spielfreien Axiallagerung von der Rotationsbewegung der Schnecke entkoppelt. Bei dieser Art der Messung handelt es sich um eine externe, bei der anhand der Lagerkraft auf das Moment geschlossen wird (Kapitel 5.4.2.1). Intern befinden sich im Sensor DMS-Streifen, die eine Verformung der Wirkflächen des Sensors detektieren. In Abbildung 7.4-15 ist der Entwurf der Kraftmessung und in Abbildung 7.4-7 und Abbildung 7.4-10 die prinzipielle Einbausituation in Gelenk 2 und 3 dargestellt.

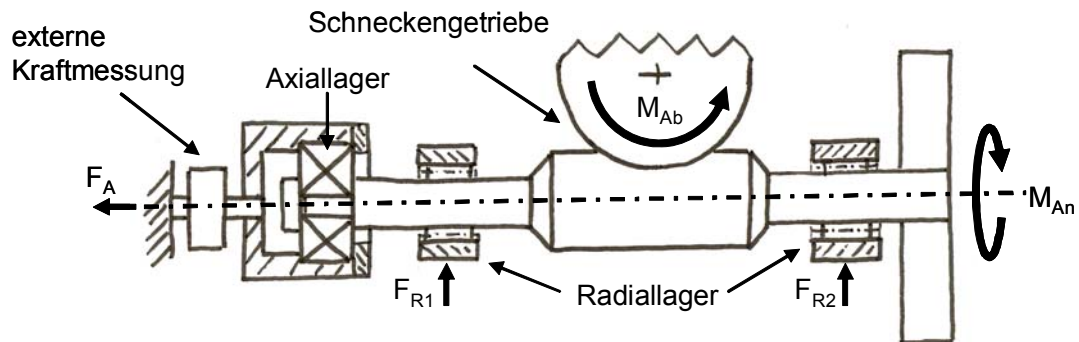


Abbildung 7.4-15: Entwurf der Kraftmessung am Gelenk 2 und 3

Eine Bestimmung des Antriebsmoments wird im Gelenk 1 an dem Hohlrohr durchgeführt, das zwischen dem Getriebe und dem anzutreibenden Segment im Antriebsstrang platziert ist. Hierbei handelt es sich um eine interne Messung. Mit DMS-Streifen wird die Torsion der Hohlwelle gemessen (Siehe Abbildung 7.4-13).

7.4.4.3 Winkelsensorentwurf

Aufgrund der im Schultergelenk geforderten höheren Genauigkeit der Winkelmessung sind in der Schulter die in Kapitel 6.3.3 schematisch dargestellten optischen Sensoren zu nutzen.

Einbauorte für die Sensoren und Sensorauswahl

Winkelsensor Gelenk 1

In Abbildung 7.4-16 sind in einer Schnittdarstellung von Gelenk 1 drei Stellen gekennzeichnet, die sich gegenüberliegen und sich relativ zueinander bewegen. Die Positionen 1 und 3 würden sich aufgrund der Lage der Wirkflächen zueinander für die optischen Sensoren eignen. Position 1 ist gegen von außen einfallendes Licht geschützt, was einem optischen Sensor entgegenkommt. Der Innenraum des Gelenks ist, um einen problemlosen Betrieb zu gewährleisten, mit Schmierfett für das Getriebe gefüllt, gegen das ein optischer Sensor gedichtet werden müsste. Daher wird davon abgesehen, an dieser Stelle den Sensor anzubringen.

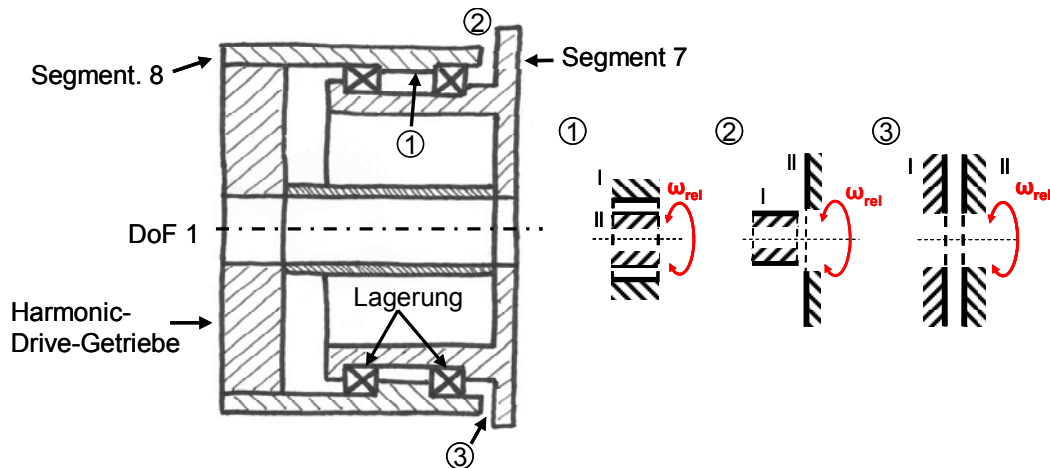


Abbildung 7.4-16: Wirkflächen am Gelenk 1, die für eine Winkelmessung genutzt werden können
 An Position 2 könnte nach dem Anbringen eines zusätzlichen Wirkflächenpaares ein optischer Sensor angebracht werden, wovon ebenfalls abgesehen wird, da der Sensor an dieser Stelle nach oben aus der Schulter des Roboters herausragen würde. Daher wird die Position 3 für den Sensor gewählt (Abbildung 7.4-17).

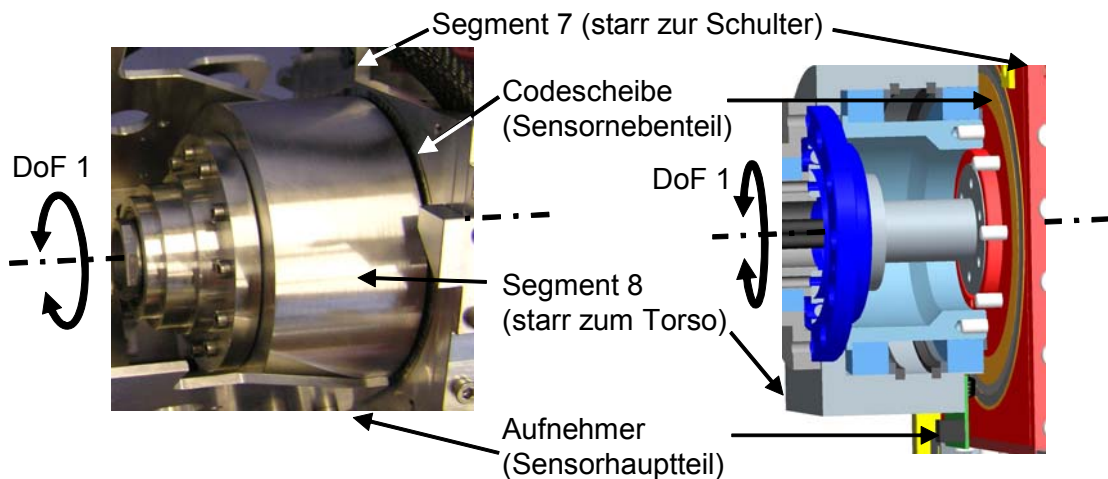


Abbildung 7.4-17: Außenansicht (Foto) und Schnittdarstellung des Winkelsensors von Gelenk 1 (CAD-Modell) (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

Die codierte Folienscheibe wird an Segment 7 angebracht und ihr gegenüber das Sensorhauptteil. Dieses wird ein Stück in das Segment 8 hinein versenkt, um den Sensor nach außen zu schützen.

Winkelsensor Gelenk 2

In Abbildung 7.4-18 sind die Orte markiert, die sich für das Anbringen der Winkelsensoren im Gelenk 2 eignen. Der Innenraum des Gelenks wird von den Antriebseinheiten benötigt und steht daher für die Winkelsensoren nicht zur Verfügung. In der Position 1 ist aufgrund der Lage der Wirkflächen zueinander ein Anbringen der optischen Winkelsensoren möglich, allerdings müsste hierfür die Tragstruktur vergrößert werden, um das Sensorhauptteil anbringen zu können.

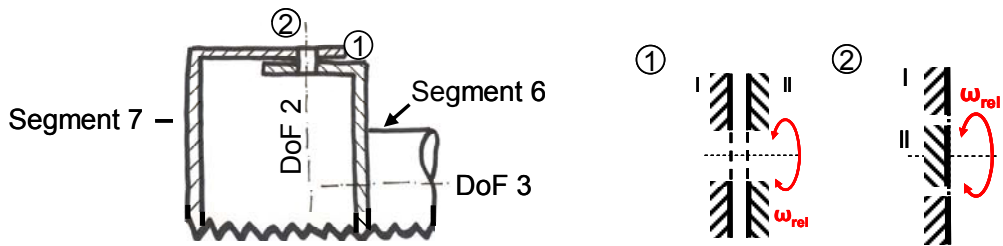


Abbildung 7.4-18: Wirkflächen am Gelenk 2, die für eine Winkelmessung genutzt werden können

Daher wurde der Ort 2 gewählt, an dem der Winkelsensor unter der Verkleidung der Schulter angebracht werden kann. Die Segmente 6 und 7 sind über eine Welle miteinander verbunden. Damit sich auf der Außenseite der Schulter zwei zueinander bewegliche Wirkflächen befinden, wird die Lagerung zwischen der Welle und dem Segment 7 angebracht. Hieraus ergibt sich der in Abbildung 7.4-18 dargestellte Fall 2, bei dem ein zusätzliches Wirkflächenpaar eingebracht werden muss, um die vom Sensor benötigte Lage der Wirkflächen zueinander zu erhalten. Abbildung 7.4-19 zeigt die Einbausituation des Sensors im Gelenk, der von einer Abdeckung geschützt ist.

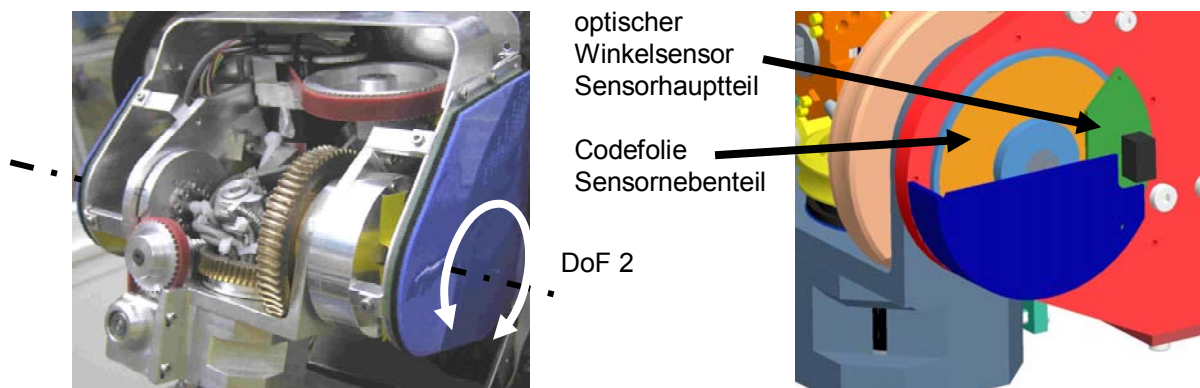


Abbildung 7.4-19: Foto und CAD-Modell des Winkelsensors in Gelenk 2 (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

Winkelsensor Gelenk 3

In Abbildung 7.4-20 sind die Orte markiert, die sich für das Anbringen eines Winkelsensors an Gelenk 3 eignen. Dies entspricht den Anbringungsorten im fluchtenden Gelenk im Ellbogen (Abbildung 7.3-11).

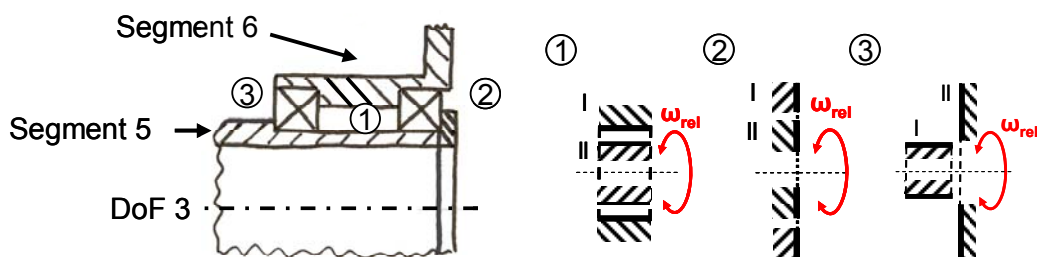


Abbildung 7.4-20: Wirkflächen am Gelenk 3, die für eine Winkelmessung genutzt werden können

Der favorisierte Ort ist die Stelle 1, da dort der Sensor gegen Umwelteinflüsse geschützt ist. Die Stelle 2 scheidet aus, da sich dort der Antrieb für das Gelenk 3

befindet, und auf der Höhe der Stelle 3 treten die Bowdenzüge für den Ellbogenantrieb aus dem Oberarm aus.

Daher wird an der Stelle 1 der Codestreifen des Sensors für eine Längenmessung um das Segment 5 gewickelt und in Segment 6 das Sensorhauptteil angebracht (Abbildung 7.4-21).

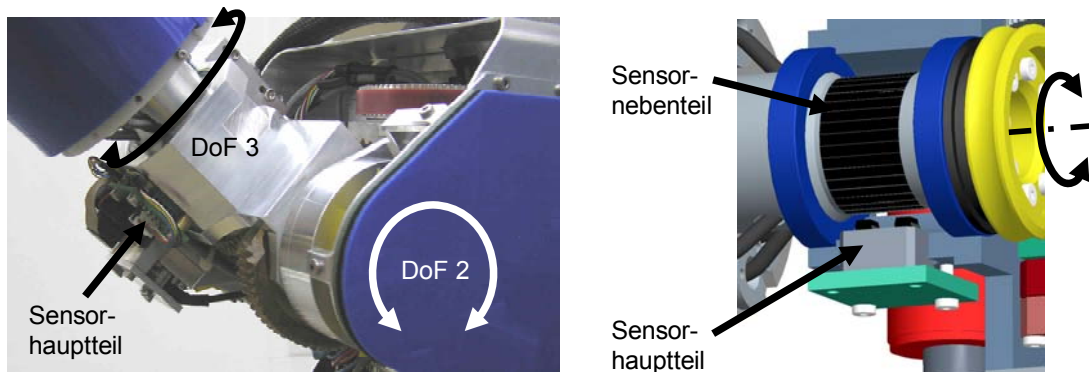


Abbildung 7.4-21: Foto und Schnittdarstellung vom Winkelsensor in Gelenk 3 (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

7.4.4.4 Konzeptionelle Verifikation der Sensorik

Die analogen Signale der Kraftmessung und die digitalen Signale der Winkelmessung können in vom Gelenkrechner zu nutzende Signale gewandelt werden. Die Sensoren sind mit der Tragstruktur kompatibel.

7.4.5 Handlungsschritt: Entwurf der Gelenkrechner und der Tragstruktur

Im Inneren des Schultergelenks besteht keine Möglichkeit, die Gelenkrechner der Schulter unterzubringen, da sich dort die Funktionseinheiten der Antriebe von Gelenk 2 und 3 befinden. Daher werden die Gelenkrechner zwischen der Tragstruktur 7 und der Verkleidung an der Außenseite der Schulter angebracht. Da dieser Bauraum auf beiden Seiten vorhanden ist, kann ebenfalls die Gelenkrechnereinheit des Handgelenks angebracht werden. Eine Platzierung dieser Gelenkrechnereinheiten im Torso würde zu Problemen aufgrund der zusätzlich durch die Schulter zu führenden Verkabelung führen. Die Tragstruktur, die als Konzept in Abbildung 7.4-3 dargestellt ist, kann so, unter Anpassung an die daran anzubringenden Komponenten, aufgebaut werden.

7.4.6 Ergebnis aus dem Systementwurf des Teilsystems der Schulter

In Abbildung 7.4-22 ist das Ergebnis des Entwurfes der Schulter mit einem Vorgriff auf die fertige Konstruktion dargestellt. Die elektronischen Teilsysteme und die Verkabelung sind in den beiden oberen Bildern noch nicht in die Schulter eingefügt. Darunter ist die Schulter mit integrierter Elektronik abgebildet.

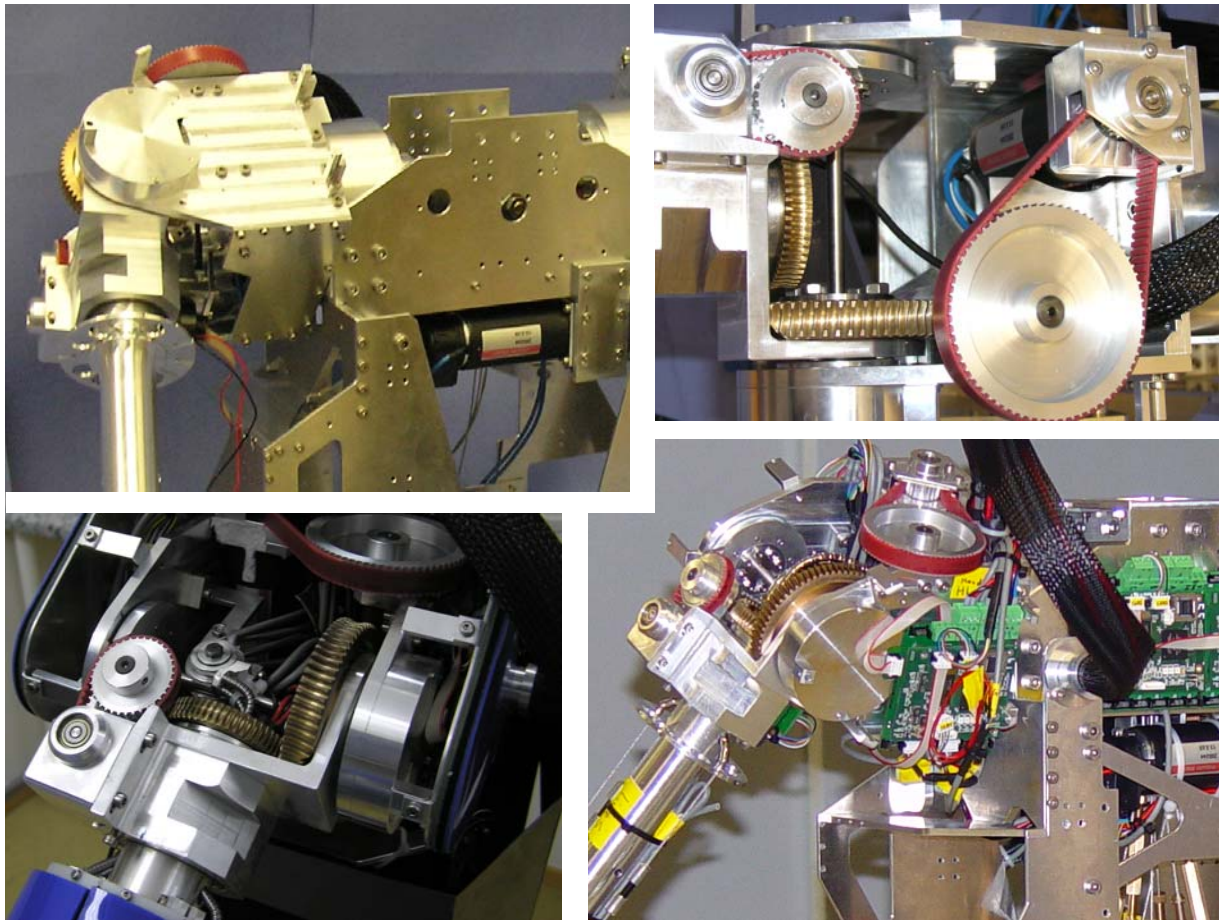


Abbildung 7.4-22: Ergebnis des Systementwurfs des Gelenkcomplexes der Schulter (Vorgriff auf die fertige Konstruktion)

7.5 Prozessabschnitt: Systementwurf des Gesamtsystems

In den Kapiteln 7.2, 7.3 und 7.4 wurden die Gelenkcomplexe Handgelenk, Ellbogengelenk und Schultergelenk entworfen. Für eine weitere Entwicklung des Systems ist es notwendig, dieses als Ganzes zu betrachten. Die Kombination der Gelenkcomplexe wird dadurch ermöglicht, dass deren Schnittstellen zueinander im Entwurf beachtet wurden. Um die Drehmasse des Arms klein zu halten, wurden die Komponenten des Arms möglichst nahe an der Basis angebracht, oder sogar in den Torso ausgelagert. Diese Komponenten konnten aufgrund der Entwicklungsreihenfolge des Entwurfs, vom Handgelenk zur Schulter, mitbeachtet werden. Am System des Arms können nun zusätzliche Bauteile befestigt werden, die den Gelenkcomplexen nicht direkt zugeordnet sind, aber während des Entwurfs der Gelenkcomplexen als Randbedingungen berücksichtigt wurden, wie z.B. die Verkleidung.

In Abbildung 7.5-1 ist der Prozessabschnitt für den Systementwurf des Gesamtsystems dargestellt. Dies ist eine Anwendung des in Kapitel 4.3 hergeleiteten Prozessabschnitts für den Systementwurf hochintegrierter mechatronischer Systeme.

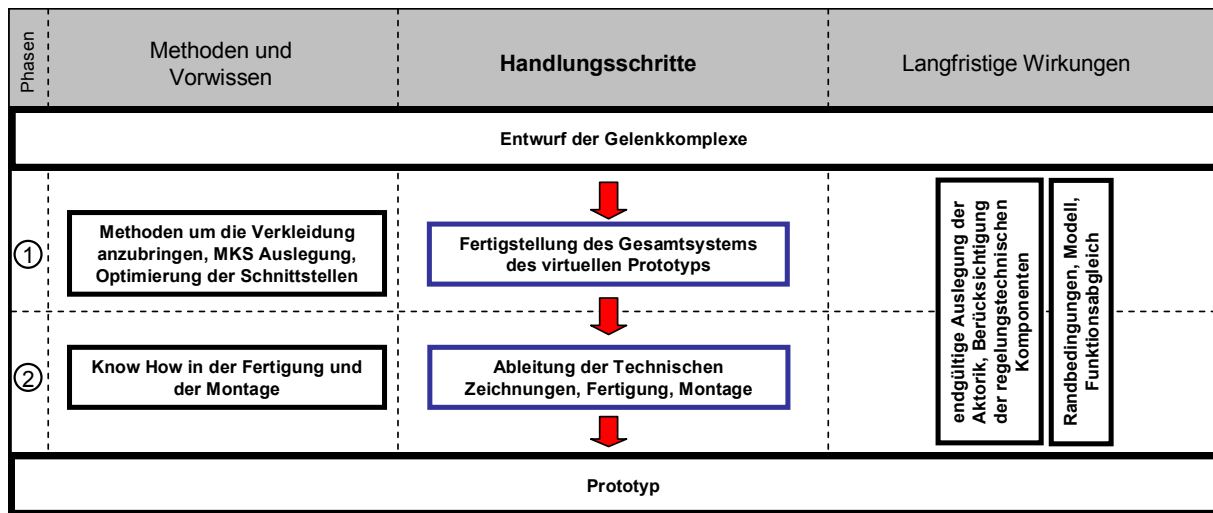


Abbildung 7.5-1: Prozessabschnitt des Systementwurfs des Gesamtsystems des Arms eines humanoiden Roboters

Ein Ziel ist, die Gestalt des Gesamtsystems so zu vereinheitlichen, dass es nicht wie eine Kombination von verschiedenen Modulen wirkt, sondern wie „aus einem Guss“. Dies betrifft das Angleichen von eventuell bestehenden Designunterschieden zwischen den Gelenkkomplexen.

7.5.1 Zusätzliche Bauteile

Der Arm kann jetzt mit einer Verkleidung versehen werden. Diese schützt vor Verunreinigungen und verleiht dem Arm ein menschliches Erscheinungsbild. Die starren Verbindungen zwischen den Gelenkkomplexen können problemlos mit einer Verkleidung versehen werden. Problematisch sind die Gelenke, deren Bewegungen von der Verkleidung auszugleichen sind. Dies kann über starre Schalen der Verkleidung gelöst werden, die sich ineinander verschieben, oder über eine Haut, die im Gelenkbereich eine ausreichende Elastizität aufweist. An dem hier entwickelten Roboterarm wird nur an starren Segmenten eine Verkleidung angebracht, die Gelenke bleiben unverkleidet. Um eine taktile Interaktion des Roboters mit seiner Umgebung zu ermöglichen, ist der Arm des Roboters mit einer Sensorhaut zu beschichten¹²¹. Diese ist an einer starren Oberfläche anzubringen und kann in maximal einer Richtung eine Krümmung aufweisen. Daher lassen sich mit dieser Haut nur ebene, zylindrische oder konische Formen beschichten, was beim Roboter am Unterarm, am Oberarm und auf der Vorder- und Rückseite der Schulter der Fall ist. Die taktile Haut des Arms ist in der Abbildung 7.5-3 zu erkennen. Die Sensorhaut ist über einen Controller an den Bus im Arm anzuschließen.

¹²¹ Göger et al. 2006

7.5.2 Aktorik

Zu diesem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses ist das Mehrkörpersystem bezüglich der darin untergebrachten Systemelemente bestimmt. Nun ist es möglich, die Auslegung der Antriebe mit den exakten Massewerten zu überprüfen. Diese Massen wurden in den vorhergehenden konzeptionellen Auslegungen soweit vorhanden mitbetrachtet oder als Schätzwerte angenommen. Daher sind bei der jetzt durchgeführten exakten Bestimmung der Antriebsparameter keine großen Veränderungen zu erwarten.

7.5.3 Gesamtsystem des Arms

Auf den folgenden Abbildungen (Abbildung 7.5-2 - Abbildung 7.5-3) ist das Gesamtsystem des hier entwickelten Arms dargestellt. Zwei dieser Arme sind am humanoiden Roboter ARMAR III angebracht.

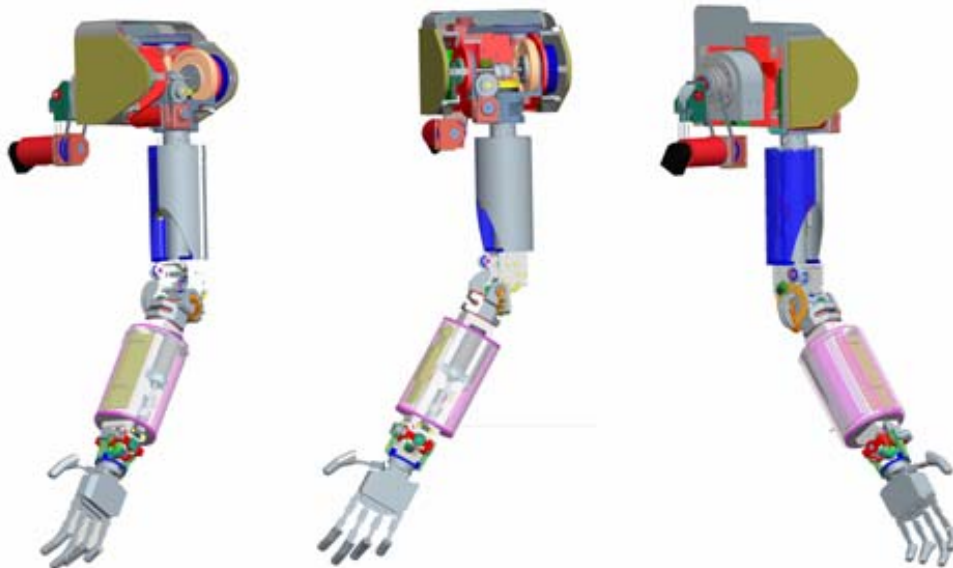


Abbildung 7.5-2: CAD-Modell des Gesamtsystem des linke Arms in drei Ansichten, ohne die in den Torso ausgelagerten Motoren des Ellbogens

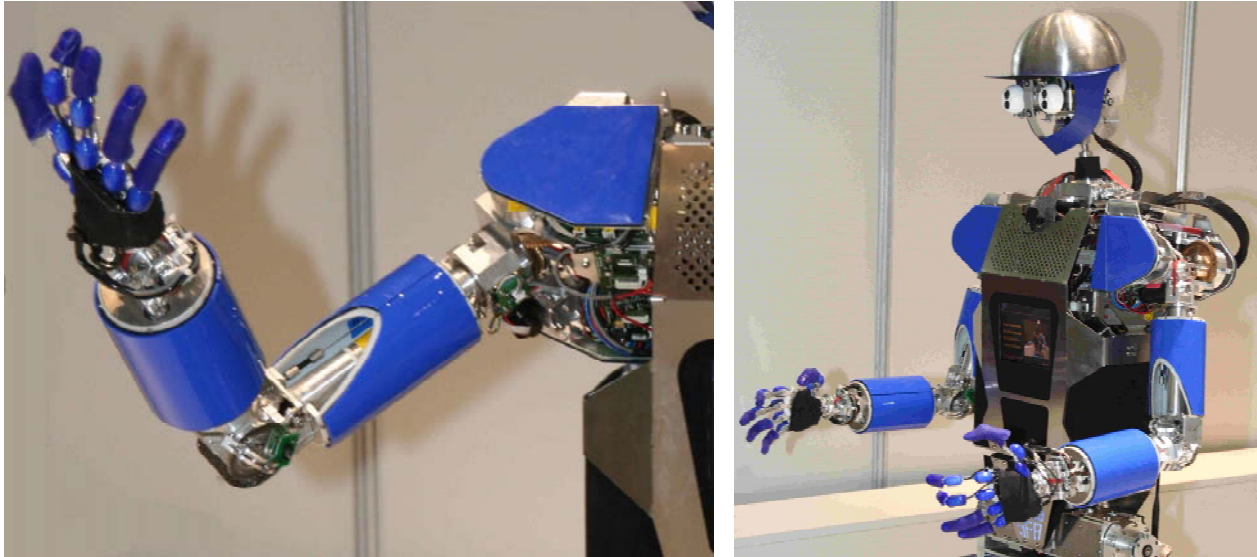


Abbildung 7.5-3: Fotos von ARMAR III auf der CeBit 2006

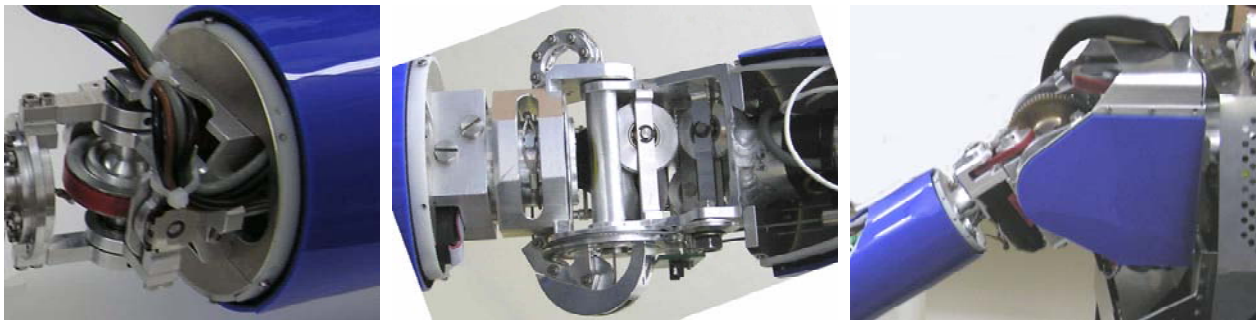


Abbildung 7.5-4: Fotos der Armgelenke: Handgelenk – Ellbogengelenk – Schultergelenk

7.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird der Entwurf des Arms eines humanoiden Roboters beschrieben. Grundlage hierfür ist eine hierarchische Unterteilung des Systems in mehrere Ebenen. Im ersten Teil des Entwurfs werden die Gelenkkomplexe bzw. Module, die sich auf einer Ebene dieser Unterteilung befinden, seriell entwickelt. Der hierbei angewandte Prozessabschnitt ist eine Anwendung des in Kapitel 4 hergeleiteten Prozessabschnitts für den Systementwurf von Teilsystemen hochintegrierter mechatronischer Systemen. Auf einer weiteren, untergeordneten Ebene befinden sich die Funktionseinheiten, denen die Anforderungen an das Gesamtsystem zugeordnet werden. Es wird eine methodische Vorgehensweise angewandt, in der die kleinsten Einheiten der Unterteilung, die Systemelemente, so kombiniert werden, dass sie zusammen die Eigenschaften und Funktionen erfüllen, die vom Zielsystem gefordert werden. Durch die Anwendung von konzeptionellen Verifikationen werden Wechselwirkungen zu noch nicht entworfenen Teilsystemen berücksichtigt. Für die Auswahl der Systemelemente in der Konzeption und im Entwurf ist der Stand der Technik in Klassifikationen aufbereitet, was in Kapitel 5 beschrieben ist.

Im zweiten Teil dieses Kapitels findet eine Anwendung des in Kapitel 4.3 hergeleiteten Prozessabschnitts für den Systementwurf des Gesamtsystems statt. In diesem werden die Module miteinander kombiniert, deren Schnittstellen zueinander im Entwurf beachtet wurden. Am Gesamtsystem des Arms werden nun die Systemanteile angebracht, für die der Arm als Ganzes zu betrachten ist, und es findet eine abschließende Auslegung, insbesondere der Aktorik, statt. Das Ergebnis hieraus ist der Prototyp des Arms des humanoiden Roboters ARMAR III.

8 Entwürfe von Teilsystemen humanoider Roboter

Durch Anwendung des Vorgehensmodells, das in dieser Arbeit exemplarisch an der Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters angewendet wird, sind weitere Teilsysteme solcher Roboter entstanden, die im Folgenden beschrieben werden.

8.1 Arm

Am Institut für Produktentwicklung wurden bisher drei Generationen von Armen humanoider Roboter aufgebaut. Alle verfügen über 7 seriell angeordnete Drehgelenke und können paarweise im Torso eines Roboters integriert werden. Von allen Armen wurde gefordert, dass sie ein möglichst geringes Eigengewicht und eine geringe Drehmasse aufweisen, um kleine Antriebe einsetzen zu können und Energie einzusparen.

Die Anforderungen an alle drei Arme entsprechen denen, die in Kapitel 6.1.1 aufgeführt sind, und die Herleitung der Kinematik ist in Kapitel 6.2 dargestellt.

8.1.1 Arm I

Im Jahr 2003 wurde der humanoide Roboterarm I aufgebaut¹²² (Abbildung 8.1-1). Das primäre Ziel bei dem Entwurf dieses Roboterarms war, die Drehmassen im Arm durch eine Auslagerung der Antriebseinheiten in den Torso möglichst klein zu halten.

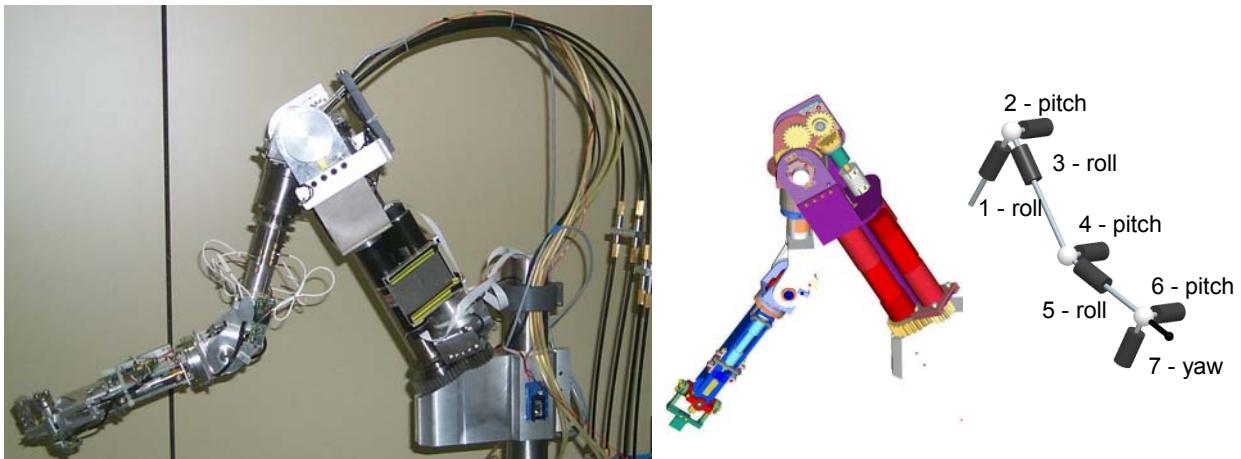


Abbildung 8.1-1: Arm der Version I mit 7 Freiheitsgraden, Foto, CAD-Bild und Kinematik

¹²² Albers et al. 2003

Schulter, Roll-Pitch-Roll-Gelenkkomplex (Gelenk 1, 2 und 3)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem eingesetzten Mehrfachgelenk handelt es sich um die Kombination 1:(f.):2+2:(nf.):1+2:(f.):1 (Tabelle 5.2-5). Zur Winkelmessung sind an allen drei Drehachsen optische Winkelsensoren angebracht.

Antriebe und Bestimmung des Antriebsmoments

Der Aktor des fluchtenden Gelenks 1 ist, wie alle drei Antriebsmotoren der Schulter, parallel zur Drehachse des ersten Gelenks montiert, die um 60° geneigt im Torso angebracht ist, und überträgt das Antriebsmoment zu der Tragstruktur des Torsos über eine Stirnradverzahnung. Der Aktor wird bei der von ihm angetriebenen Bewegung mitbewegt. Als nächstes folgt das nicht fluchtende Gelenk 2, zu dem das Moment, ohne Überbrückung eines Freiheitsgrads, über eine Verzahnung übertragen wird. Zu dem dritten Gelenk 3, einem fluchtenden Gelenk, wird das Moment über eine Verzahnung übertragen, und der Antriebsstrang überbrückt dabei eine Drehachse. Die Drehung des Oberarms ist vom Heben des Arms abhängig. Die anderen Bewegungen sind unabhängig. Die Übersetzung aller drei Antriebe erfolgt über ein an den Aktor angeschlossenes mehrstufiges Planetengetriebe. Allen drei eingesetzten Motorgetriebekombinationen ist eine Torsionswelle nachgeschaltet, die mit DMS-Sensoren bestückt ist und eine Messung des Antriebsmoments ermöglicht.

Ellbogen, Pitch-Roll-Gelenkkomplex (Gelenk 4 und 5)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem Mehrfachgelenk handelt es sich um die Kombination 2:(nf.):1+2:(f.):1 (Tabelle 5.2-3), die in Abbildung 5.2-15 a) aufgrund der Massenverteilung empfohlen wird. An beiden Gelenken sind Drehpotentiometer zur Winkelmessung angebracht.

Antriebe und Bestimmung des Antriebsmoments

Angetrieben werden beide Gelenke von Servomotoren, die in den Torso ausgelagert sind. Die Aktoren treiben über ein mehrstufiges Planetengetriebe jeweils eine Seilrolle an, um die ein umlaufender Seilzug geführt ist. Die Seilzüge werden durch Bowdenzüge zur Schulter und dort in das Oberarmrohr geführt. Unterhalb der Schulter verlaufen die Seilzüge neben der Tragstruktur des Oberarmrohrs bis in das Ellbogengelenk. Beide Antriebe werden von den überbrückten Gelenken nicht beeinflusst. Eine Kraftmessung wird mit Zugkraftsensoren durchgeführt, die auf der Höhe des Oberarms in die Seilzüge integriert sind.

Handgelenk, Pitch-Yaw-Gelenkkomplex (Gelenk 6 und 7)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem eingesetzten Mehrfachgelenk handelt es sich um die Kombination 2:(nf.):1+1:(nf.):2 (Tabelle 5.2-2), die in Abbildung 5.2-14 als Kombination b) aufgrund des Bewegungsraumes empfohlen wird. Für eine Bestimmung der Achswinkel sind an den Gelenken absolut messende magnetoresistive Sensoren angebracht, die nur einen kleinen Bauraum benötigen.

Antrieb und Bestimmung des Antriebsmoments

Angetrieben werden beide Gelenke von Servomotoren, die in den Torso ausgelagert sind. Beide Motoren treiben eine Kugelumlaufspindel an, die eine Drehbewegung in eine Linearbewegung wandelt. Durch diese Linearbewegungen werden zwei beidseitig wirkende hydraulische Zylinder angetrieben, die jeweils über zwei biegsame Hydraulikschläuche mit identischen Zylindern im Unterarm verbunden sind, die dort die gleichen Bewegungen wie die antreibenden Zylinder durchführen. Die Linearbewegung einer Zylinderstange treibt im Handgelenk einen Seilzug an, der um das anzutreibende Gelenk 6 geschlungen ist. Das Yaw-Gelenk 7 wird über eine kardatisch angetriebene Welle bewegt. Dieses Kardangelen überbrückt im Antriebsstrang das Gelenk 6. Der Gelenkwinkel 7 ist über den Kardanfehler von der Winkelstellung des Gelenks 6 abhängig. Eine direkte Messung der antreibenden Momente beider Gelenke wird im Handgelenk nicht durchgeführt. Stattdessen ist die Hand mit einer 6-Achsen-Kraftmessdose mit dem Handgelenk verbunden. Über die Belastung, die von der Hand auf das Handgelenk übertragen wird, können die antreibenden Momente bestimmt werden.

Spezielle Features

Alle Antriebe aus den Armsegmenten unterhalb der Schulter sind in den Torso ausgelagert. Der Arm ist durchgehend hohl.

8.1.2 Arm II

Der Roboterarm II wurde im Jahr 2004 fertig gestellt¹²³ (Abbildung 8.1-2). Die Arme I und II, bei denen es sich um einen linken und einen rechten Arm handelt, wurden konzipiert, um sie zusammen in einen Oberkörper integrieren zu können. Sie verfügen demnach über die identische, gespiegelte Kinematik.

Der Arm II ist gegenüber der Vorgängerversion ausgeprägter funktional und räumlich integriert. Auf alle schweren Teile in den Antriebssträngen im Arm, wie z.B. gekapselte Getriebeeinheiten, wurde verzichtet. Die Antriebseinheiten der Schulter unterscheiden sich grundlegend von denen der Vorgängerversion. Grund hierfür ist die Vermeidung

¹²³ Albers et al. 2004

von Spiel in den Gelenken und eine Einsparung von Bauraum und Gewicht. Das hydraulische Antriebskonzept des Handgelenks von Arm I wurde geändert und die Aktoren für das Handgelenk wieder in den Unterarm integriert. Trotzdem konnte eine Gewichtsverringerung im Unterarm durch den Einsatz von leichten Systemelementen im Antriebsstrang erreicht werden.

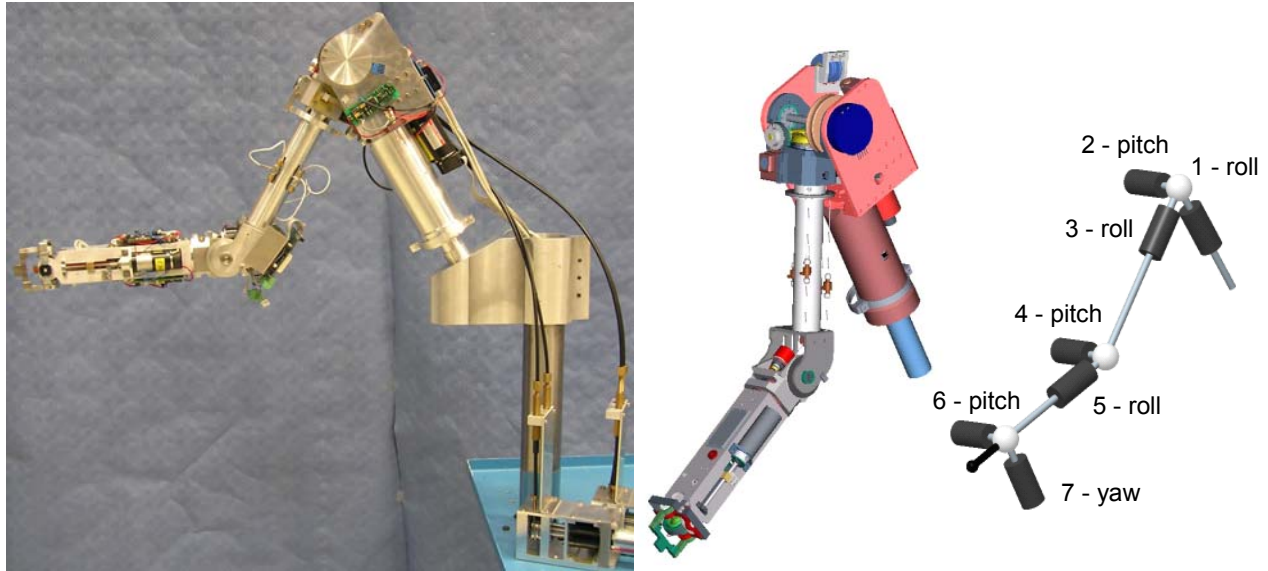


Abbildung 8.1-2: Arm der Version II mit 7 Freiheitsgraden, Foto, CAD-Bild und Kinematik

Schulter, Roll-Pitch-Roll-Gelenkkomplex (Gelenk 1, 2 und 3)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem eingesetzten Mehrfachgelenk handelt es sich um die Kombination 1:(f.):2+2:(nf.):1+2:(f.):1 (Tabelle 5.2-5). Die Winkelmessung wird in allen drei Drehachsen mit optischen Winkelsensoren durchgeführt.

Antriebe und Bestimmung des Antriebsmoments

Der Arm ist an einem Hohlrohr aufgehängt, das um 60° geneigt im Körper des Roboters angebracht ist. Der Antrieb für das erste fluchtende Gelenk befindet sich in diesem Rohr und wird bei den Bewegungen des Arms nicht mitbewegt. Die Antriebseinheit besteht aus einem Servomotor, einem Harmonic-Drive-Getriebe und einer Torsionswelle, die mit DMS-Streifen bestückt ist und an der das Antriebsmoment bestimmt wird. Die Aktorik der Gelenke 2 und 3 ist ähnlich aufgebaut. Ein Servomotor treibt jeweils über ein Zahnriemengetriebe eine Schneckenwelle an. Die Schneckenwelle ist mit einem Schneckenrad im Eingriff, mit dem das angetriebene Armsegment verbunden ist. Das Schneckenrad, mit dem die Oberarmdrehung angetrieben wird, hat in der Mitte eine Öffnung, die einen Zugang zum Oberarmrohr bereitstellt. Das Antriebsmoment wird über die Axialkraft im Schneckenrad gemessen. Die drei Antriebe in der Schulter sind jeweils an dem Segment der Tragstruktur neben dem Gelenk angebracht. Daher sind alle Gelenke voneinander unabhängig.

Ellbogen, Pitch-Roll-Gelenkkomplex (Gelenk 4 und 5)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem eingesetzten Mehrfachgelenk handelt es sich um die Kombination 2:(nf.):1+2:(f.):1 (Tabelle 5.2-3), die in Abbildung 5.2-15 als Kombination b) aufgrund der Massenverteilung empfohlen wird. Für die Winkelmessung werden Drehpotentiometern eingesetzt.

Antriebe und Bestimmung des Antriebsmoments

Der Antrieb der beiden Gelenke im Ellbogen ist ähnlich zu den Antrieben der Ellbogengelenke in der Armversion I. Die Servomotoren sind in den Torso des Roboters ausgelagert und treiben dort über ein Harmonic-Drive-Getriebe eine Seilscheibe an. Die Seilscheiben sind wiederum über einen beidseitigen Seilzug mit den anzutreibenden Gelenken verbunden. Primärer Unterschied besteht in der Verlegung der Bowdenzüge, die nicht mehr in einem Bogen, sondern senkrecht von der Schulter nach unten zu den Antrieben geführt werden. Um dies zu erreichen, werden die Seilzüge über Seilrollen aus der Schulter nach unten geleitet. Die Gelenke sind von allen überbrückten Drehachsen unabhängig. Zur Kraftmessung befinden sich Zugkraftsensoren auf der Höhe des Oberarms in den Seilzügen.

Handgelenk, Pitch-Yaw-Gelenkkomplex (Gelenk 6 und 7)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei den eingesetzten Mehrfachgelenken handelt es sich um die Kombination 2:(nf.):1+1:(nf.):2 (Tabelle 5.2-2), die in Abbildung 5.2-14 als Kombination b) aufgrund des Bewegungsraums und des Bauraums empfohlen wird.

Antriebe und Bestimmung des Antriebsmoments

Die Systemelemente im Antriebsstrang, die sich direkt an den Gelenken befinden, sind identisch mit denen im Arm der Version I. Geändert hat sich der Ort, an dem die Aktoren angebracht sind. Die Aktoren des Handgelenks sind in dieser Version in den Unterarm integriert. Die Rotationsbewegung der Antriebswelle des Aktors wird über eine Gewindespindel auf die Antriebsstränge der beiden Gelenke übertragen (siehe Arm I).

Spezielle Features

Der Arm ist durchgehend hohl. Gewicht des Ober- und des Unterarms 3,5 kg.

8.1.3 Arm III

Die Entwicklung des Arms III¹²⁴ ist in Kapitel 6 und 7 dargestellt. Zwei dieser Arme sind im Oberkörper des Roboters ARMAR III eingebaut (Kapitel 8.4.2).

8.2 Hals

Der menschliche Hals verfügt über 7 Halswirbel, die sich zueinander um jeweils drei Freiheitsgrade rotatorisch und um zwei ein kleines Stück translatorisch bewegen können. Die Bewegungen der Halswirbel sind miteinander gekoppelt. Die Halsbewegungen lassen sich in ihren Extremstellungen in einem Modell auf die Rotationen um vier Drehachsen zurückführen. Dies ist in Abbildung 8.2-1, unter Angabe der Bewegungswinkel, dargestellt.

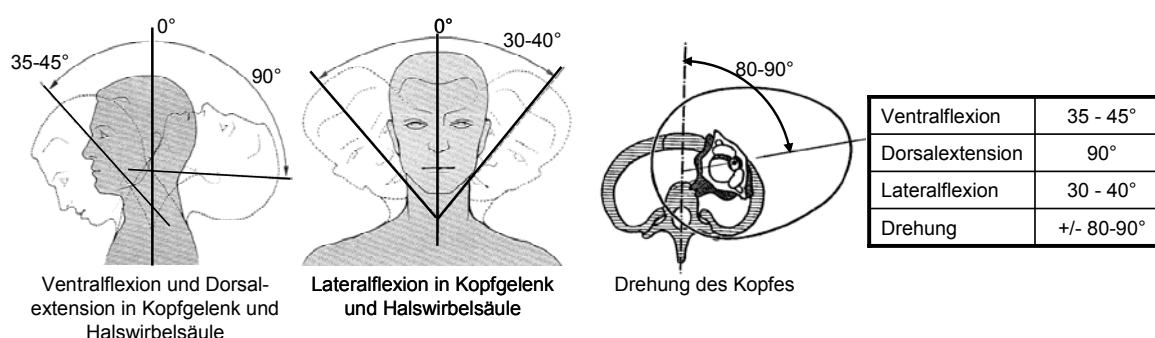


Abbildung 8.2-1: Bewegungen des menschlichen Halses¹²⁵

Für eine Vereinfachung des Modells, um es in einem Technischen Gelenkkomplex abzubilden, schneiden sich die Drehachsen der Lateralflexion und der Ventralflexion in einem Punkt am unteren Halsende. Um die Neigebewegung des Halses nach von und hinten der menschlichen Bewegung anzupassen, gestattet die gemeinsame Drehachse der Ventralflexion und der Dorsalextension, die sich auf der Höhe des menschlichen Atlas befindet, ein Vor- und Zurückbeugen des Halses.

Die Drehung des Kopfes wird in allen Positionen durch einen Freiheitsgrad in der Halsachse ermöglicht. Diese geht in ihrer Beweglichkeit über das hinaus, was dem Menschen möglich ist, da dieser für eine Drehung des Kopfes zusätzlich den Torso verdreht, der beim Roboter starr ist. Die Halsgelenke sollen voneinander unabhängig bewegt werden können. Mit dieser Halskinematik, die in Abbildung 8.2-2 dargestellt ist, sind humanoid wirkende Bewegungen möglich.

¹²⁴ Albers et al. 2006b

¹²⁵ Rauber 1987; Kapandji 1985

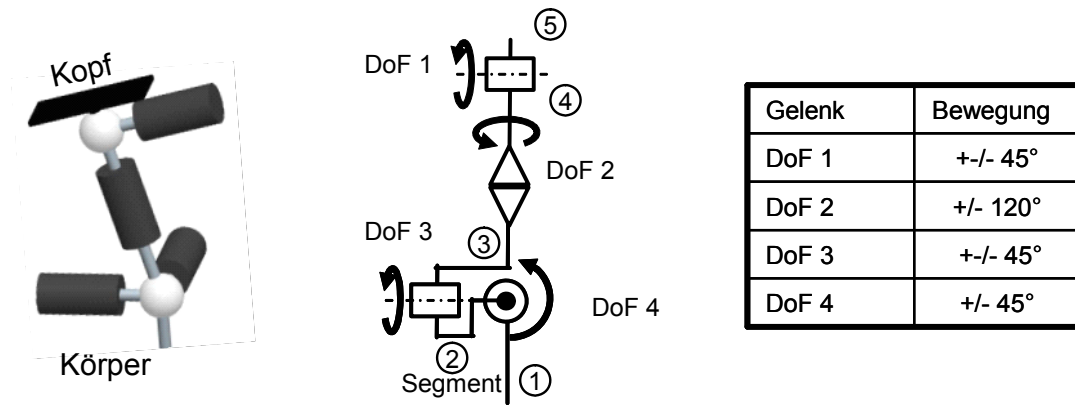


Abbildung 8.2-2: Kinematik, Anordnung der Drehachsen und Bewegungsraum des Halsmodells

8.2.1 Hals I

Der Leitgedanke bei der Entwicklung dieses Halses, der im Jahr 2003 fertiggestellt wurde (Abbildung 8.2-3), war die Drehmassen des Systems klein zu halten. Hierfür wurden die Antriebsmotoren, so weit dies möglich ist, in den Torso ausgelagert. Als zentrales Gelenk befindet sich am Halsansatz ein Kardangelenk. Alle vier Antriebe sind mit einem mehrstufigen Planetengetriebe und einem Encoder verbunden.

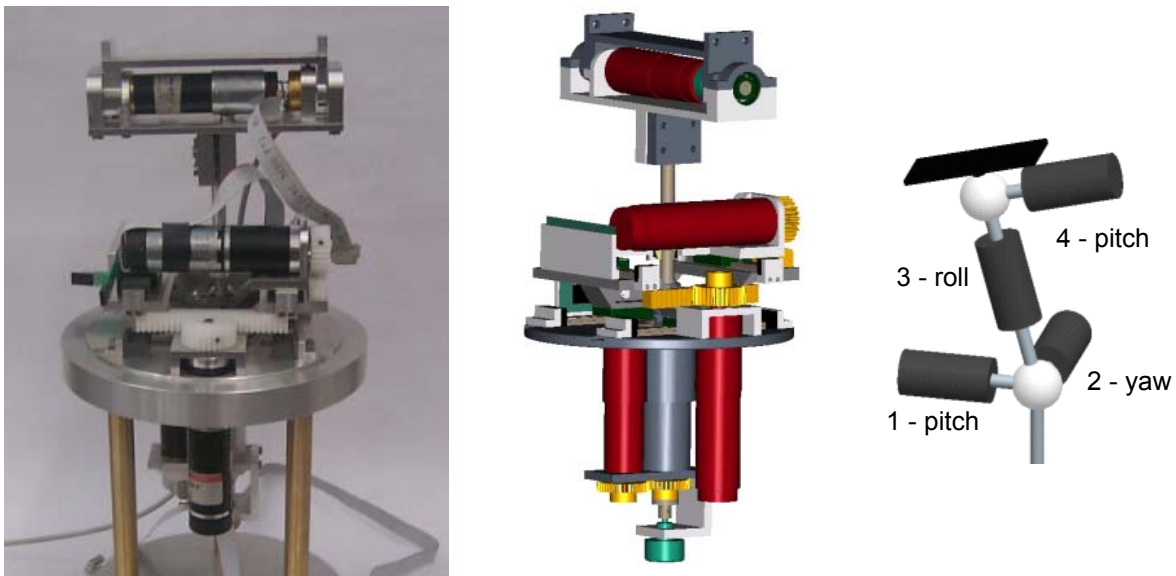


Abbildung 8.2-3: Hals der Version I mit 4 Freiheitsgraden, Foto, CAD-Bild und Kinematik

Unteres Halsgelenk, Roll-Pitch-Yaw-Gelenkkomplex (Gelenk 1, 2 und 3)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem Mehrfachgelenk handelt es sich um ein drehbar gelagertes Kardangelenk in der Kombination $2:(nf.):1+1:(nf.):2+2:(f.):1$ (Tabelle 5.2-4), die in Abbildung 5.2-17 aufgrund des Bewegungsraums als Kombination b) empfohlen wird. Die Winkelpositionen können nicht direkt im Kardangelenk bestimmt werden, da dort nicht genügend Bauraum für die Sensoren vorhanden ist. Daher wird der Verfahrensweg des führenden

Antriebs bestimmt. Die Winkelposition der Drehung des Halses wird mit einem Drehpotentiometer gemessen.

Antriebe

Der Antrieb der Pitch- und der Yaw-Bewegung des Halses erfolgt mit einem führenden Antrieb, der aus zwei linear beweglichen, übereinander geschichteten Platten besteht. Die obere Platte ist über ein Kugelgelenk mit der Halswelle verbunden. Ein Punkt auf der Welle bewegt sich bei seinen Bewegungen auf einem Kugelsegment und ein Punkt auf der oberen führenden Platte auf einer Ebene. Um dies und die Rotation des Halses, die von unten angetrieben wird, auszugleichen, kann sich die Halswelle in dem Kugelgelenk drehen und linear verschieben. Die Halswelle kann sich in diesem Gelenk um vier Freiheitsgrade passiv bewegen.

Der Aktor der Pitch-Bewegung (Gelenk 1) treibt die untere Platte der führenden Mechanik über eine Zahnrad-Zahnstangenverbindung an und wird bei den Halsbewegungen nicht mitbewegt. Die zweite Platte wird von einem Aktor angetrieben, der auf der zweiten Platte angebracht ist und diese ebenfalls über eine Zahnrad-Zahnstangenverbindung relativ zur ersten Platte bewegt. Die Drehung des Halses wird (Gelenk 3) durch eine Drehung der Welle angetrieben, auf welcher das Kardangelenke montiert ist. Der Antrieb erfolgt über einen Aktor, der sich unterhalb des Halses befindet. Zu beiden Neigebewegungen des Halses besteht eine Kopplung in Form des Kardanfehlers.

Oberes Halsgelenk, Pitch-Gelenkkomplex (Gelenk 4)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem Mehrfachgelenk handelt es sich um ein beidseitig gelagertes Pitch-Gelenk (Kombination (nf.), Abbildung 5.2-12). An einer Seite des Gelenks ist ein Drehpotentiometer angebracht.

Antrieb

Die Nickbewegung wird von einem Aktor angetrieben, der koaxial zu der Drehachse zentral im Gelenk angebracht ist und das Moment auf eine Seite des nicht fluchtenden Gelenks überträgt.

Spezielle Features

Die Antriebe des ersten und des dritten Gelenks sind von den Bewegungen ausgelagert, und der Antrieb des zweiten Gelenks wird nur ein Stück von der führenden Kinematik mitbewegt.

8.2.2 Hals II

Nach Untersuchungen zu den im Hals eingesetzten Systemelementen und Funktionseinheiten¹²⁶ ist 2005 der in Abbildung 8.2-4 abgebildete Hals II entstanden. Die Kinematik dieses Halses ist identisch mit der in der Halsversion I. Verändert wurden die Antriebe, bei denen es sich hier um separate Gelenkantriebe handelt, die jeweils an dem Segment neben dem Gelenk angebracht sind. Das Hauptziel bei der Entwicklung dieses Halsgelenks war, spielfreie Antriebe einzusetzen, mit denen sich in Kombination mit einer exakten Winkelsensorik präzise Halsbewegungen durchführen lassen. Angetrieben werden alle vier Halsgelenke mit Servomotoren, die an ein Harmonic-Drive-Getriebe angeschlossen sind.

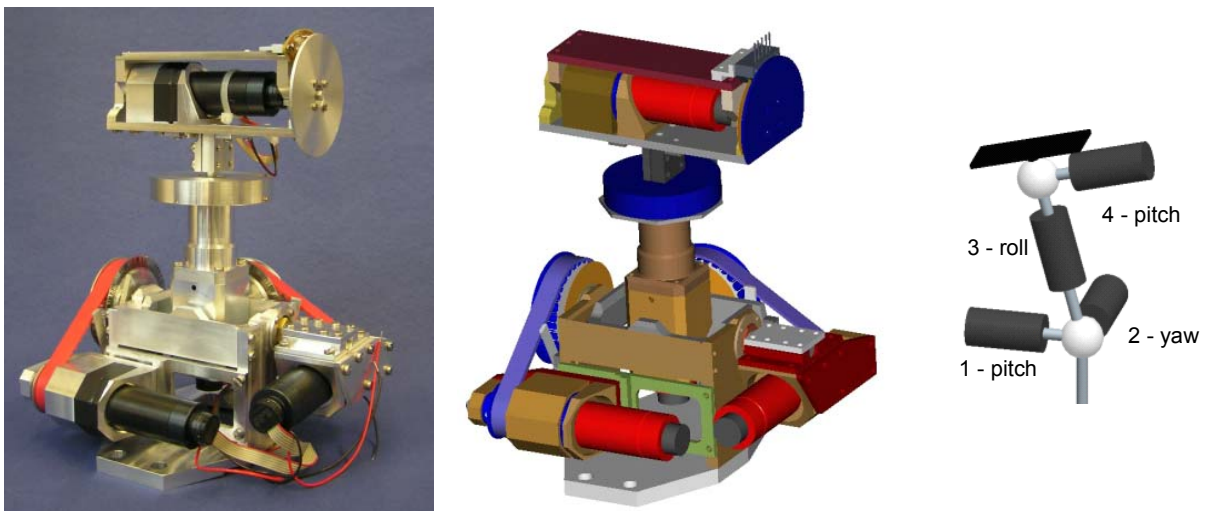


Abbildung 8.2-4: Hals der Version II mit 4 Freiheitsgraden, Foto, CAD-Bild und Kinematik

Unteres Halsgelenk, Roll-Pitch-Yaw-Gelenkkomplex (Gelenk 1, 2 und 3)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dieser seriellen Anordnung von zwei nicht fluchtenden und einem fluchtenden Gelenk handelt es sich um die Kombination $2:(nf.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1$ (Tabelle 5.2-4), die in Abbildung 5.2-16 b) aufgrund der Massenverteilung empfohlen wird. Die Gelenkwinkel werden an allen drei Freiheitsgraden mit quasiabsoluten optischen Sensoren bestimmt.

Antriebe

Die Aktoren der beiden Neigebewegungen sind parallel zur Drehachse angebracht und übertragen das Antriebsmoment mit einem Zahnriemen, der eine zusätzliche Übersetzung ermöglicht, auf das Gelenk. Der Antrieb des fluchtenden Gelenks in der Halswelle ist koaxial in diese integriert.

¹²⁶ Guerra 2000 , Diplomarbeit am Institut für Produktentwicklung

Oberes Halsgelenk, Pitch-Gelenkkomplex (Gelenk 4)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

Bei dem Mehrfachgelenk handelt es sich um ein beidseitig gelagertes Pitch-Gelenk (Kombination (nf.), Abbildung 5.2-12). An einer Seite des nicht fluchtenden Gelenks ist von außen ein quasiabsoluter optischer Winkelsensor angebracht.

Antriebe

Der Antrieb befindet sich mittig zwischen den Lagerungen des Gelenks und überträgt die Antriebsleistung an die dem Winkelsensor gegenüberliegende Seite.

Spezielle Features

Das Halsgelenk ermöglicht spielfreie, exakte Bewegungen.

8.3 Torsogelenk

8.3.1 Torsogelenk I

Mit dem Torsogelenk¹²⁷, das drei Freiheitsgrade aufweist, kann der Oberkörper nach vorne und ein Stück nach hinten geneigt werden. Er kann seitlich wanken und sich um die vertikale Körperachse drehen.

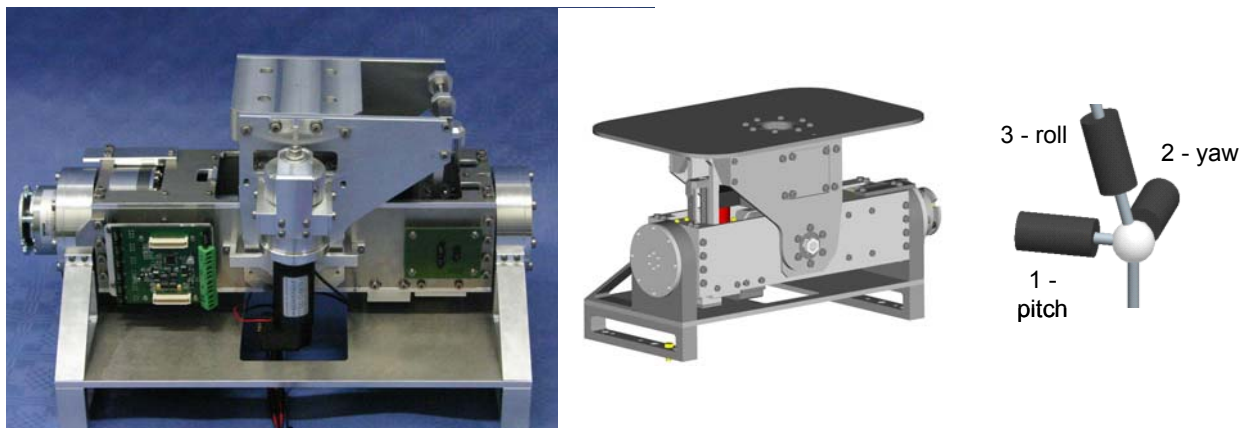


Abbildung 8.3-1: Torsogelenk mit 3 Freiheitsgraden, Foto, CAD-Bild und Kinematik

Torsogelenk, Roll-Pitch-Yaw-Gelenkkomplex (Gelenk 1, 2 und 3)

Mehrfachgelenk und Winkelmessung

In diesem Mehrfachgelenk sind zwei nicht fluchtende und ein fluchtendes Gelenk seriell geschaltet. Es handelt sich um die Kombination 2:(nf.):1+2:(nf.):1+2:(f.):1 (Tabelle 5.2-4), die in Abbildung 5.2-16 b) aufgrund der Massenverteilung empfohlen wird. Die Gelenkwinkel werden an zwei Freiheitsgraden (Gelenk 1 und 2) mit

¹²⁷ Sauter 2005, Diplomarbeit am Institut für Produktentwicklung

Drehpotentiometern bestimmt und am dritten (Gelenk 3) mit einem quasiabsoluten Winkelsensor (Abbildung 6.3-5).

Antriebe und Bestimmung des Antriebsmoments

Für die Beugebewegung nach vorne und hinten sind ein Servomotor und ein Harmonic-Drive-Getriebe koaxial zur Drehachse angebracht. In diesem Gelenk befindet sich zusätzliche eine Bremse, die nur öffnet, solange sie vom Gelenkrechner ein Stromsignal erhält. Dies verhindert, dass der Oberkörper im stromlosen Zustand nach vorne kippt. Das seitliche Neigen des Oberkörpers wird von einem Servomotor angetrieben, der über einen Zahnriemen eine Kugelumlaufspindel antreibt, die seitlich der Drehachse angebracht ist. Diese Übersetzung dämpft eine nicht angetriebene Bewegung des Gelenks, ist aber nicht selbsthemmend. Daher ist dieses Gelenk ebenfalls mit einer Bremse gesichert. Die Drehung des Körpers wird von einem Servomotor angetrieben, der über ein Harmonic-Drive-Getriebe und einen Zahnriemen mit der Drehachse verbunden ist.

8.4 Oberkörper

Die hier genutzten Oberkörper bestehen aus einer starren Struktur, in der die Systemelemente der Körpersegmente des Roboters integriert sind.

8.4.1 Oberkörper I

Bei dem Oberkörper der ersten Version handelt es sich um eine Tragstruktur, an der die Arme I und II und der Hals der Version I zusammen integriert sind (Abbildung 8.4-1).

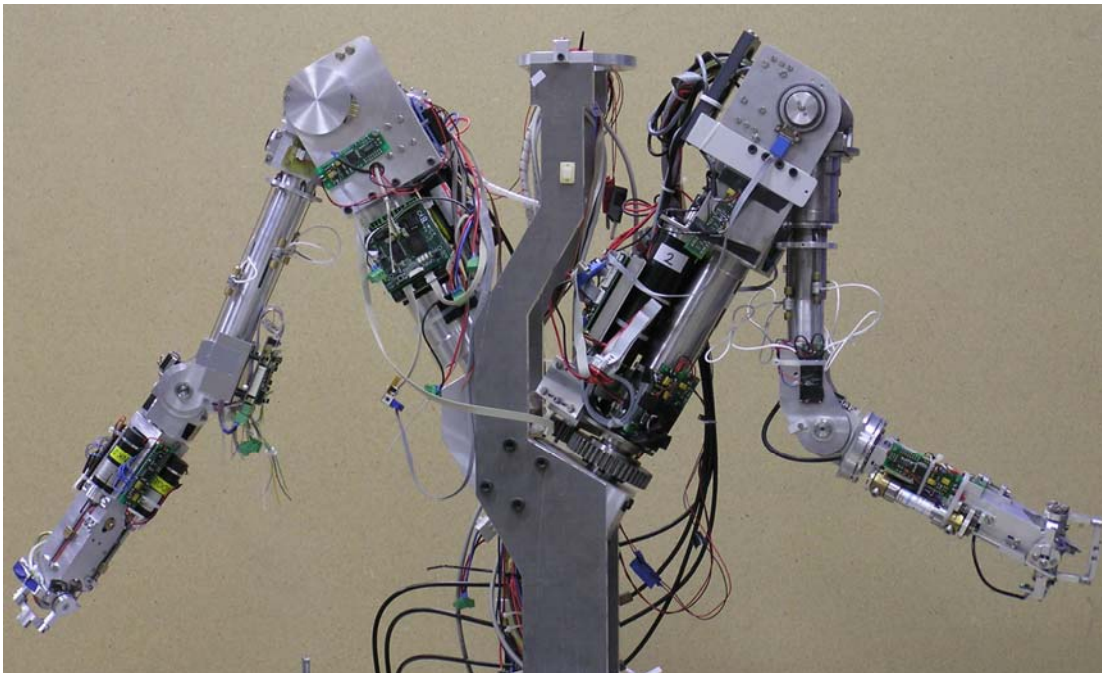


Abbildung 8.4-1: Oberkörper der Version I mit 18 Freiheitsgraden (Darstellung ohne Hals)

Der Torso ist starr auf einer Platte montiert, auf der die ausgelagerten Antriebe der beiden Arme befestigt sind.

8.4.2 Oberkörper II

In dem Oberkörper der zweiten Generation sind zwei Arme III, der Hals II und das Torsogelenk I angebracht (Abbildung 8.4-2). Die Tragstruktur ist starr und ermöglicht eine Integration der Antriebe beider Ellbogengelenke. Über diesen Antrieben, die oberhalb des Torsogelenks auf der Grundplatte des Thorax angebracht sind, befinden sich zwei Rechner. Das Torsogestell ist dafür ausgelegt, dass der Roboter in jeder möglichen Armposition ein Gewicht von 3 kg in jeder Hand statisch halten kann und das er mit 1 kg in der Hand in jeder Position eine Bewegung starten kann.

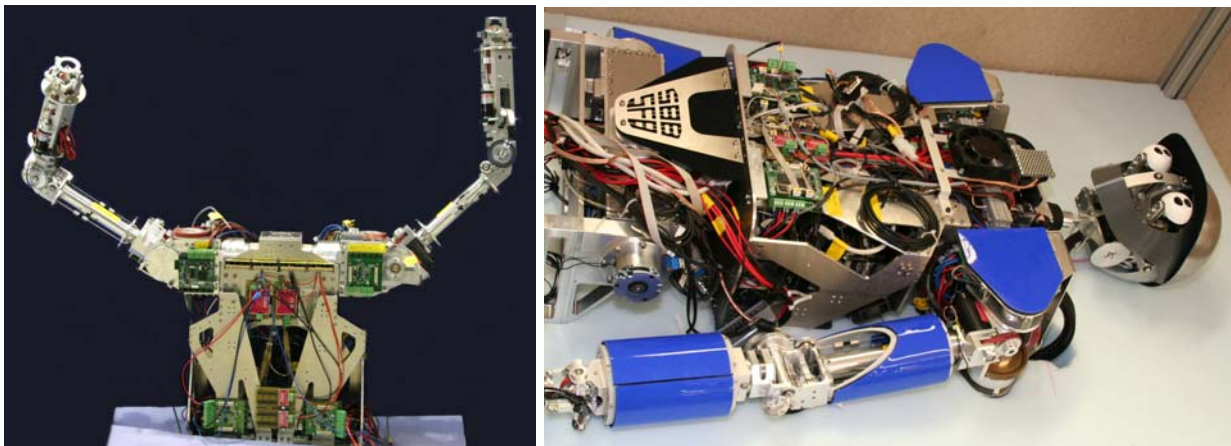


Abbildung 8.4-2: Oberkörper der Version II mit 21 Freiheitsgraden

8.5 Gesamtsystem humanoider Roboter ARMAR III

Der Oberkörper II ist in das Gesamtsystem des humanoiden Roboters ARMAR III des Sonderforschungsbereiches 588 integriert¹²⁸ (Abbildung 8.5-1). Der Oberkörper sitzt auf einer omnidirektional angetriebenen Plattform. In dieser sind die Batterien für die Spannungsversorgung des Gesamtsystems untergebracht. Auf dem Hals befindet sich eine Pan-Tilt-Einheit, mit der die Kameras getrennt voneinander horizontal und vertikal gekoppelt bewegt werden können. Die Handgelenke sind mit pneumatisch angetriebenen Händen verbunden.

¹²⁸ Asfour et al. 2006a

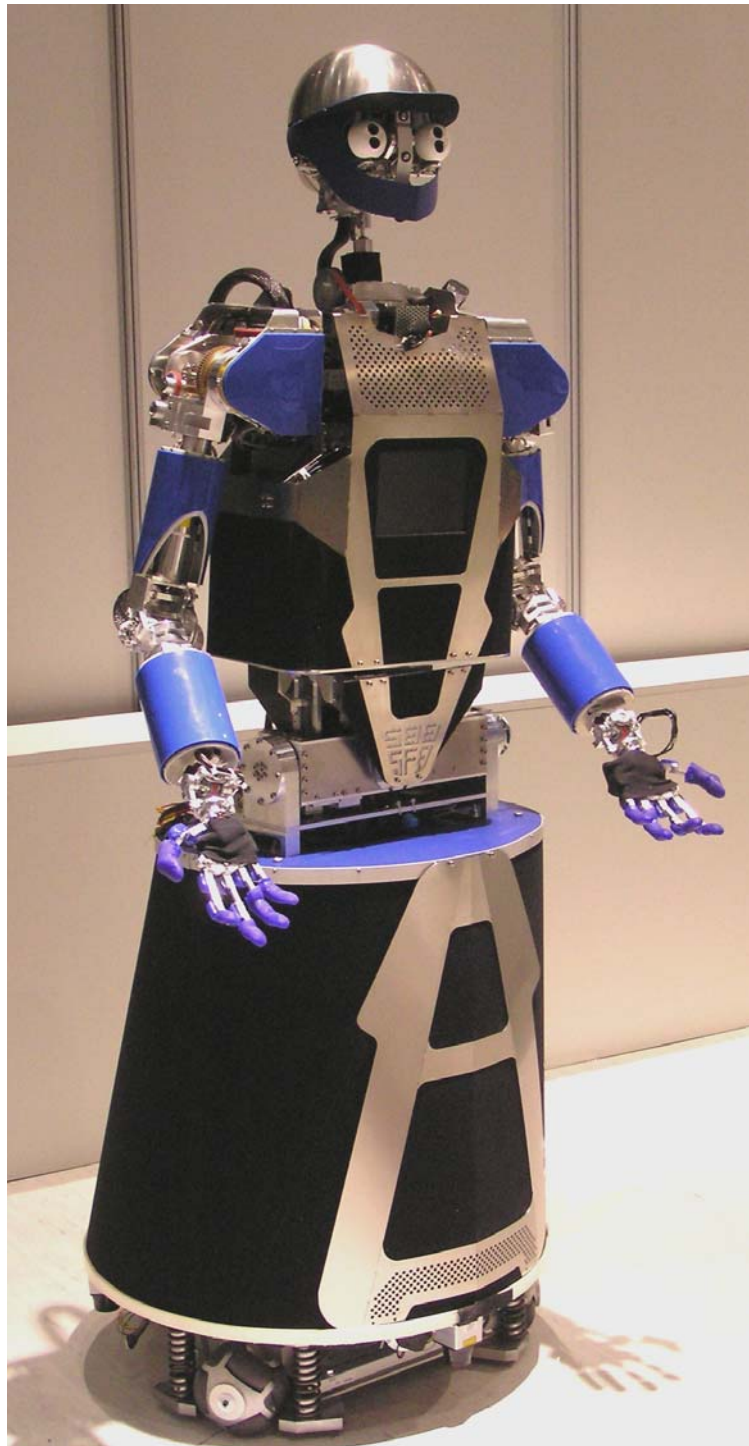


Abbildung 8.5-1: Humanoider Roboter ARMAR III mit 43 Freiheitsgraden

8.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden einige Teilsysteme humanoider Roboter vorgestellt, die mithilfe des in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehensmodells für hochintegrierte mechatronische Systeme entstanden sind.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen hergeleitet. An der beispielhaften Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters – im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 588 „Humanoide Roboter – Lernende und kooperierende multimodale Roboter“¹²⁹ – erfolgt die Verifikation dieses Vorgehensmodells.

9.1 Zusammenfassung

Zusammenfassung der Kapitelinhalte

Im Stand der Technik in Kapitel 2 werden momentan existierende humanoide Roboter von internationalen Forschungseinrichtungen vorgestellt. Über Methoden, die bei der Entwicklung der komplexen mechatronischen Systeme humanoider Roboter angewendet werden, existiert kein veröffentlichtes Wissen. Hiernach werden in diesem Kapitel bestehende Entwicklungsmethoden und Vorgehensmodelle für allgemeine Systeme und für allgemeine mechatronische Systeme beschrieben. Aufgrund der großen Unterschiede, die zwischen mechatronischen Systemen bestehen, können allgemeingültige Vorgehensmodelle nicht auf die im jeweiligen Entwicklungsprojekt auftretenden Problemstellungen eingehen. Hieraus ergibt sich ein Bedarf an Vorgehensmodellen für die Entwicklung von Systemen mit gleichen Eigenschaften, auf die gezielt eingegangen werden kann. Ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen und speziell von Systemen humanoider Robotern wird in Kapitel 3 als das Ziel dieser Arbeit formuliert.

In Kapitel 4 wird ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von mechatronischen Systemen hergeleitet, das an Systeme angepasst ist, deren Systemelemente räumlich und funktional stark integriert sind (hochintegrierte Systeme) und die über einen mechanischen Anteil verfügen, der aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Anteilen aller Domänen dominierend ist. Anhand dieser Merkmale kann das System hierarchisch gliedert werden. Diese Gliederung ermöglicht zu Beginn der Entwicklung eine grobe Unterteilung und mit zunehmenden Informationen über das System eine immer detailliertere. Auf einer Ebene in dieser Unterteilung befinden sich die kleinsten Teilsysteme, die unter Berücksichtigung ihrer Schnittstellen zueinander im Entwicklungsprozess separat betrachtet werden können. Diese Teilsysteme stellen Module

¹²⁹ SFB588

dar, die in der Entwicklung austauschbar sind, was einer entwicklungsbezogenen Modularisierung entspricht. Zwischen den Entwicklungen der Module und zwischen den Entwicklungen der darin enthaltenen Teilsysteme verlaufen Informationsflüsse. Das Vorgehen in der Entwicklung der Teilsysteme orientiert sich an diesen Informationsflüssen. Die Teilsysteme üben aufeinander ausgeprägte Wechselwirkungen aus. Weiterhin wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, diese Wechselwirkungen im Entwicklungsprozess zu beachten, was zu einem durchgängigen Informationsfluss im Prozess führt.

In den folgenden Kapiteln wird dieses Vorgehensmodell an der Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters angewandt und dabei verifiziert.

Komplexe mechatronische Systeme bestehen aus einer Vielzahl von Teilsystemen, die wiederum aus einer Vielzahl von Systemelementen aufgebaut sind, die in der hier angewandten Unterteilung die kleinsten Einheiten darstellen. Im Stand der Technik sind viele unterschiedliche technische Lösungen für die Funktionserfüllung der Systemelemente enthalten. Die Eigenschaften und Funktionen des Systems ergeben sich aus dem Zusammenwirken der Systemelemente mit ihren spezifischen Eigenschaften und Funktionen. Um diese sich hieraus ergebende große Vielfalt in der Entwicklung von Systemen humanoider Roboter zu beherrschen, wird der Stand der Technik von mechanischen Systemelementen, die im Roboter integriert werden, in Kapitel 5 in Klassifikationen abgebildet, die eine auf das Zielsystem abgestimmte Entwicklung ermöglichen.

In Kapitel 6 wird der erste Teil des Vorgehensmodells, die Konkretisierung des Zielsystems, an der Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters angewandt. Hierin erfolgt eine Umwandlung des primären Zielsystems, in dem allgemeine Anforderungen an den humanoiden Roboter enthalten sind, in ein konkretisiertes Zielsystem mit quantitativen Anforderungen an das Gesamtsystem des Arms.

Das Zielsystem des Arms wird im Folgenden auf die Funktionseinheiten in den Modulen des Arms abgebildet. Dies sind Teilsysteme, die sich in der hierarchischen Unterteilung des Systems ergeben haben und denen die quantitativen Anforderungen zugeordnet werden können. Durch Anwendung des zweiten Teils des Vorgehensmodells, dem Systementwurf der Teilsysteme, werden in Kapitel 7 die Module im Arm des humanoiden Roboters entwickelt. Hiernach erfolgt im Rahmen des dritten Teils des Vorgehensmodells, dem Systementwurf des Gesamtsystems, eine Kombination der Module und die Fertigstellung des zu entwickelnden Roboterarms.

Im Kapitel 8 werden verschiedene Teilsysteme humanoider Roboter vorgestellt, die durch die Anwendung des hier beschriebenen Vorgehensmodells entstanden sind.

Im Anhang ist eine tabellarische Klassierung der Systemelemente im Antriebsstrang dargestellt, die für die Entwicklung des Arms eines humanoiden Roboters in Kapitel 7

benötigt wird. Weiterhin sind im Anhang die „three laws of robotics“ von Isaac Asimov und ein Glossar für die in dieser Arbeit genutzten Fachbegriffe enthalten.

Bewertung des Entwicklungsergebnisses vom Entwurf des Arms eines humanoiden Roboters

Insgesamt führt die Anwendung des Vorgehensmodells deutlich schneller zu einem Ergebnis, das den Anforderungen aus dem Zielsystem entspricht, als ein ungesteuertes Vorgehen. Die Vorarbeiten für die Anwendung dieses Vorgehensmodells sind umfangreich, da zuvor der Stand der Technik der zu integrierenden Systemelemente in Klassifikationen abzulegen ist. Allerdings ist die Untersuchung und Aufbereitung des Stands der Technik eine Voraussetzung für jede Entwicklung, unabhängig davon, welche Vorgehensweise angewandt wird, und stellt somit keine zusätzliche Mehrarbeit dar.

Durch den Einsatz von konzeptionellen Verifikationen werden Iterationen zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklung in der Regel vermieden, können aber nicht grundsätzlich verhindert werden. Wenn solch eine Iteration trotzdem auftritt, sind durch das methodische Vorgehen Informationen über Alternativlösungen entstanden, wodurch die Iterationen beschleunigt bearbeitet werden können.

Um einen robusten Betrieb des Endproduktes sicher zu stellen, sind detaillierte Informationen über die Systemelemente im Einsatz unter verschiedenen Bedingungen in den Klassierungen abzulegen. Die Systemelemente werden im Roboter teilweise unter sehr speziellen Randbedingungen eingesetzt, über die keine Informationen vorhanden sind. Das Erfahrungswissen, das hierbei entsteht, ist in die Klassierungen mit einzupflegen. Dies hat im Arm dazugeführt, dass ein dauerhafter Betrieb des Arms zu Beschädigungen der Seilzüge für den Antrieb der beiden Gelenke im Ellbogen führt. Die Schäden treten im Schultergelenk an der Stelle auf, in der die Bowdenzüge in einer engen Krümmung in den Oberarm geführt werden. Grund hierfür ist, dass in der genutzten Seilzugführung sich im Dauerbetrieb Kanten bilden, über welche die Seilzüge geführt und dabei beschädigt werden. Dies wäre in der Konzeption zu vermeiden gewesen, wenn Informationen über solch ein Verhalten vorhanden gewesen wären. So musste das Problem durch eine nachträgliche Modifikation behoben werden.

9.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in verschiedenen Forschungsbereichen weitergeführt. Hierbei handelt es sich zum einen um die Weiterentwicklung der mechatronischen Systeme des humanoiden Roboters und zum anderen um die Weiterentwicklung der methodischen Vorgehensweise zum Aufbau hochintegrierter mechatronischer Systeme.

Weiterentwicklung der Systeme humanoider Roboter

- Die Kinematik des Robotersystems kann in zukünftigen Arbeiten der Kinematik des Menschen weiter angenähert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Erweiterung des Bewegungsraums des Arms durch die Integration eines Schultergürtels.
- Ein wichtiges Ziel ist es, zukünftig den Roboter energiesparend aufzubauen, um das Speichern und den Transport der Energie, insbesondere bei mobilen Systemen, zu verbessern. Hierfür gilt es zu untersuchen, inwieweit eine Orientierung an der Struktur des menschlichen sensomotorischen Systems eine Verringerung des Energieverbrauchs bewirkt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit durch Rekuperation die Bewegungsenergie zurück zu gewinnen, wenn Gelenke abgebremst werden.
- Bei zukünftigen Entwicklungen ist das Gesamtgewicht des Systems zu verringern, was ebenfalls zu einem geringeren Energiebedarf bei den Bewegungen führt. Dies ist möglich durch konzeptionelle Verbesserungen, durch die massebehaftete Bauteile vermieden werden, oder durch eine bessere Auslastung der genutzten Werkstoffe sowie durch den Einsatz von neuen Werkstoffen, wie z.B. Faserverbundwerkstoffen. Ein großes Potential zur Verringerung der Masse ist der Einsatz von Aktoren mit einer höheren Leistungsdichte und der Einsatz von neuen Antriebskonzepten.

Weiterentwicklung der methodischen Vorgehensweise zur Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme

- Klassierungen bieten die Möglichkeit, auch für andere Entwicklungsprojekte genutzt zu werden. Dies führt letztendlich zu einer umfassenden Datenbank, die Zugriff auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Systemelemente gewährt, die unabhängig von dem jeweils zu entwickelnden System sind. Weiterhin sind den Klassen und Systemelementen funktionale Informationen zu hinterlegen. Dies ermöglicht es jederzeit in der Entwicklung, d.h. auf beliebigem Abstraktionsniveau, die Funktionen des Objektsystems durch Simulationen zu verifizieren. In der Industrie besteht hierfür ein großer Bedarf, und es existieren Ansätze, dies in bestimmten Anwendungsfällen umzusetzen¹³⁰.
- Aufbau von umfassenden Klassierungen (Datenbanken) unterschiedlicher Ordnung für alle Teilsysteme von hochintegrierten Systemen, in denen Informationen über die Funktionen, Schnittstellen und Eigenschaften hinterlegt sind. Dies ermöglicht von Beginn der Entwicklung an, den Stand der Technik zu beachten und jederzeit für das aktuelle Objektsystem Simulationen bereitstellen zu können.

¹³⁰ Brechter / Lui-Henke 2006

- Eine Entwicklung mithilfe einer objektorientierten Semantik und das Hinterlegen von Datenbanken, die sich auf die Schnittstellen und die Funktionen beziehen, ermöglichen eine Automatisierung der Entwicklung. Ein hierfür zu entwerfendes Automatisierungstool könnte alle Kombinationen von Systemelementen bestimmen, die zusammen die geforderten Funktionen erfüllen und über die geforderten Eigenschaften verfügen. Eine letztendliche Auswahl müsste trotzdem von einem Entwickler erfolgen, da für die Erfahrung, die Kreativität und die Intuition des Ingenieurs kein Ersatz existiert¹³¹.
- Die objektorientierte Entwicklung hat ihren Ursprung in der Entwicklung von Software, in der die kleinsten Programmabschnitte („Objekte“) nach logischen Kriterien aneinandergesetzt werden. Hierbei spielen physikalische Eigenschaften wie Größe, Gewicht, Auslegung usw., wie sie in Hardwarekomponenten auftreten, keine Rolle. Daher ist es insbesondere für eine Automatisierung der Entwicklung von mechatronischen Systemen notwendig, die Objekte und Klassen, in denen der Stand der Technik aller Komponenten dieser Systeme hinterlegt ist, mit diesen physikalischen Eigenschaften zu versehen. Eine Verbindung von objektorientierten Modellen mit dem C&CM, das solche Eigenschaften mit einbindet, stellt eine Möglichkeit dar, zukünftig ein solches umfassendes Modell aufzubauen.
- Die Entwicklungswerkzeuge der Domänen haben mittlerweile ein sehr hohes Niveau erreicht. Beispiele hierfür sind CAD-Programme und Simulationswerkzeuge. Diese Werkzeuge sind momentan nicht miteinander kompatibel und es ist fraglich, ob sie dies in absehbarer Zukunft sein werden. Eine Lösung hierfür wäre ein umfassendes Modell des Zielsystems, auf das alle Werkzeuge Zugriff haben und es durch ihre domänenspezifischen Entwicklungen verändern. Die sich hieraus ergebenden Auswirkungen auf die anderen Domänen wären sofort offensichtlich. Objektorientierte Modelle haben das Potenzial dafür, zukünftig diese Aufgabe zu übernehmen.

¹³¹ Hahn et al. 1997

10 Literaturverzeichnis

- Abdalla 2006** Abdalla, Jamal: *A communication model for structural design objects. I: Channels and medium*. In: *Advances in Engineering Software*, Elsevier Science Ltd., Volume 37, Issue 6 (June 2006), Pages: 382 – 392, 2006, ISSN:0965-9978
- Acker 2001** Acker, Heinrich: *Berührungslose Drehmomentenmessung mit elektrischen und magnetischen Feldern*. Universität Darmstadt, (Diss.), 2001, Fortschritt-Bericht VDI, ISBN 3-18-389208-1;
- Agilent 2006** Agilent Technologies: Product Information, 2006 - URL: <http://www.agilent.com/semiconductors>
- AKACHI et al 2005** AKACHI, Kazuhiko ; KANEKO, Kenji ; KANEHIEA, Noriyuki ; OTA, Shigehiko ; MIYAMORI, Go: Development of Humanoid Robot HRP-3P. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2005*, 5th IEEE-RAS, Tsukuba, Japan, 5-7.12.2005
- Albers 2002** Albers, Albert: Conceptual Design of Humanoid Robots. In: *The Third IARP International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics*, Tsukuba Research Centre, AIST, Japan, Dec.11-12, 2002
- Albers et al. 2002** Albers, Albert ; Saak, Marcus ; Burkardt, Norbert: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mithilfe der SPALTEN-Methode. In: 47. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universität Illmenau, 23.-26. September 2002
- Albers et al. 2003** Albers, Albert ; Brudniok, Sven ; Burger, Wolfgang: The Mechanics of a Humanoid. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2003*, IEEE, VDI/VDE-GMA, Karlsruhe, 2003, 1-3 Oct.
- Albers et al. 2004** Albers, Albert ; Brudniok, Sven ; Burger, Wolfgang: Design and Development Process of a Humanoid Robot upper Body through Experimentation. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2004*, IEEE-RAS/RSJ, Santa Monica, Los Angeles, USA, 10-12 November 2004
- Albers / Brudniok 2005** Albers, Albert ; Brudniok, Sven: Methodische Entwicklung der mechatronischen Strukturen Humanoider Roboter. In: *Innovative Produktentwicklung - Mechatronik 2005*, VDI/VDE, Wiesloch, 1.-2. Juni 2005 (VDI-Bericht Nr. 1892)
- Albers et al. 2006a** Albers, Albert ; Burkardt, Norbert ; Deigendesch, Tobias: Processes, methods and tools in product development of multi-scale systems. In: *Process Tools & Methods in Competitive Engineering TMCE 2006*, Ljubljana, Slovenia, April 18-22
- Albers et al. 2006b** Albers, Albert ; Brudniok, Sven ; Otnad, Jens ; Sauter, Christian ; Sechcharn, Korkiat: Upper Body of a new Humanoid Robot – the Design of ARMAR III. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2006*, IEEE-RAS, Genova, Italy, December 4 to 6, 2006
- Albers / Alink 2007** Albers, Albert ; Alink, Thomas: Support of design engineering activity for a systematic improvement of product. In: *17th CIRP International Design Seminar*, Berlin, Germany, 27-28 March

- Albers / Brudniok 2007** Albers, Albert ; Brudniok, Sven: Methodische Entwicklung von hochintegrierten mechatronischen Systemen am Beispiel eines Humanoiden Roboters. In: *Innovative Produktentwicklung - Mechatronik 2007*, VDI/VDE, Wiesloch, 23.-24.5.2007 (VDI-Bericht Nr. 1971)
- Albers / Burkardt 2007** Albers, Albert ; Burkardt, Norbert: *Produktentstehung – Entwicklungsmethodik*. Vorlesung an der Universität Karlsruhe (TH), Institut für Produktentwicklung, 2007
- Albers / Meboldt 2007a** Albers, Albert ; Meboldt, Mirko: SPALTEN Matrix – product development process on the basis of systems engineering and systematic problem solving. In: *Proceedings of the 17th CIRP Design Conference*, Berlin 2007
- Albers / Meboldt 2007b** Albers, Albert ; Meboldt, Mirko: A reference Model for product development processes, based on Systems Engineering and systematic Problem Solving. In: *International conference on engineering design, ICED'07, PARIS, FRANCE, 28 - 31 AUGUST 2007*
- Albers et al 2007** Albers, Albert ; Alink, Thomas ; Oerding, Jochen: Unterstützung der kreativen Phasen im Produktentwicklungsprozess mit dem Elementmodell C&CM. In: *Optimierung der Produktentwicklung, 5. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik*, Dresden, 20. und 21.09.2007
- Aluminium 2003** Aluminium Taschenbuch, 1 *Grundlagen und Werkstoffe*. 16. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2003
- Asfour 2003** Asfour, Tamim: *Sensomotorische Bewegungskoordination zur Handlungsausführung eines humanoiden Roboters*. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik, (Diss.), 2003, ISBN 3-89863-146-X
- Asfour et al. 2006a** Asfour, T. ; Regenstein, K. ; Azad, P. ; Schröder, J. ; Bierbaum, A. ; Vahrenkamp, N. ; Dillmann, Rüdiger: ARMAR-III: An Integrated Humanoid Platform for Sensory-Motor Control. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2005*, December 2006, Genova, Italy, December 4 to 6, 2006
- Asfour et al. 2006b** Asfour, T. ; Regenstein, K. ; Azad, P. ; Schröder, J. ; Dillmann, R.: ARMAR-III: A HUMANOID PLATFORM FOR PERCEPTION-ACTION INTEGRATION. In: *Proceedings of the second international workshop on Human-Centred Robotic Systems*, HCRS, Munich, Germany, 2006, 6.-7. October 2006
- Asimov 1950** Asimov, Isaac: *I, Robot*. Oxford University Press, 2000, ISBN 0-19-4230694, Original edition 1950
- ATI 2006** ATI Industrial Automation: *Catalogue, Product Information, Multi-Axes Force/Torque Sensors*. 2006 - URL: <http://www.ati-ia.com>
- Baijun 2004** Baijun, Shi: *Design for Multi-Technology Systems*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, (Diss.), 2004, ISBN 3-18-117001-8
- Borutzki 2000** Borutzki, Wolfgang: *Bondgraphen - Eine Methode zur Modellierung multidisziplinärer dynamischer Systeme*. SCS Publishing House – Erlangen Ghent, Frontiers in Simulation, 2000, ISBN 1-56555-183-4
- Brechter / Lui-Henke 2006** Brechter, Daniel ; Lui-Henke, Xiaobo: Eine datenbankbasierte Softwareumgebung zur Unterstützung des mechatronischen Entwurfs. In: *4. Paderborner Workshop, Entwurf mechatronischer Systeme*, 2006

- Brockhaus 2005** Brockhaus 2005(c) Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2005
- Browning 1998** Browning, Tyson: Use of Dependency Structure Matrices for Product Development Cycle Time Reduction. In: *Proceeding of the Fifth ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications*, Tokyo, Japan, July 15-17, 1998
- Browning 2001** Browning, Tyson: Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. In: *IEEE Transaction on Engineering Management*, Vol. 48, No. 3, August 2001
- Bundesministerium 1992** Bundesministerium des Innern: *Planung und Durchführung von IT-Vorhaben. Vorgehensmodel*, August 1992
- Busch et al. 2001** Busch, T.: Kugelmotor als mehrachsiger Direktantrieb. In: *Innovative Produktentwicklung - 4. VDI Mechatronik Tagung 2001* Frankenthal, 2001, ISBN 3-18-091631-1 (VDI-Bericht 1634)
- Clarkson et al. 2004** Clarkson, John, P. ; Simons, Caroline ; Eckert, Claudia: Predicting Change Propagation in Complex Design. In: *Journal of Mechanical Design*, Vol. 126, September 2004
- Conrad 2005** Conrad, Klaus-J.: *Grundlagen der Konstruktionslehre, Methoden und Beispiele für den Maschinenbau*. Hanser Verlag, 2005, ISBN 3-446-40471-6
- Craig 2005** Craig, N, J.: *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*. Third Edition, 2005, ISBN 0-13-123629-1
- Daenzer / Huber 2002** Daenzer, W. F. ; Huber, F.: *Systems Engineering*, 11. Auflage, Verlag Industrielle Organisation Zürich, ISBN 3-85743-998-X, 2002
- Denavit 1955** Denavit, J. ; Haxtenberg, R. S. : A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. In: *ASME Journal of Applied Mechanics*, S. 215-221, 1955
- Dillmann 1991** Dillmann, Rüdiger ; Ruck, Martin: *Informationsverarbeitung in der Robotik*. Berlin : Springer, 1991
- Duray et al. 2000** Duray, Rebecca ; Ward, Peter ; Milligan, Glenn ; Berry, William: Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. *Journal of Operations Management*, 18(6), 2000, 605-625
- Ehrlenspiel 1995** Ehrlenspiel, Klaus: *Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*. München : Hanser Verlag, 1995, ISBN 3-446-15706-9
- Featherstone 1983** Featherstone, R.: Position and Velocity Transformations between Robot End-Effektor Coordinates and Joint Angles. In: *International Journal of Robotic Research*, 2(2):35-45,1983
- Föllinger 1994** Föllinger, Otto: *Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 8. überarbeitete Auflage, Heidelberg : Hüttig, 1994, ISBN 3-7785-2336-8
- Gausemeier / Lückel 2000** Gausemeier, Jürgen ; Lückel, Joachim: *Entwicklungsumgebung Mechatronik, Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn : Bonifatius GmbH, 2000, Band 80, ISBN 3-931466-79-5

- Gausemeier / Frank 2006** Gausemeier, Jürgen ; Frank, Ursula: Stand und Perspektiven der Entwicklung mechatronischer Systeme. In: *4. Paderborner Workshop, Entwurf mechatronischer Systeme*, 30.-31. März 2006
- Göger et al. 2006** Göger, Dirk ; Weiß, Karsten ; Burghart, Catherina ; Wörn, Heinz: Sensitive skin for a humanoid robot. In: *Human-Centred Robotic Systems, HCRS'06*, Munich, October 6th and 7th, 2006
- Grabowski et al. 1996** Grabowski, H. ; Rude, S. ; Langlotz, G.: Aufbau von Wissensspeichern für die Lösungsfindung im Produktentwicklungsprozess. In: *41. Internationales wissenschaftliches Kolloquium*, Ilmenau, 1996
- Gross et al 2005** Gross, Dietmar ; Hauger, Werner ; Schnell, Walter: *Technische Mechanik 2, Elastostatik*, 8. Auflage, Springer, 2005, ISBN 3-540-24312-7
- Guerra 2000** Guerra, Daniel, Rojo: *Verbesserter Aufbau des Halsgelenkes eines humanoiden Roboters mit 4 Freiheitsgraden*. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, (Diplomarbeit), 2000
- Hahn et al. 1997** Hahn, M. ; Lückel, J. ; Wittler, G.: Eine Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme. In: *3. Magdeburger Maschinenbau-Tage, Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau*, Magdeburg, 11. bis 13. September 1997
- Harmonic Drive 2005/2006** Harmonic Drive AG, *Präzision in Bewegung, Katalog 2005/2006*
- Hiller / Woernle 1986** Hiller, M. ; Woernle, C.: *Ein systematisches Verfahren zur numerischen Behandlung der Rücktransformation bei Industrierobotern*. VDI-Berichte, Nr. 598, 1986
- Hirai 1997** Hirai, Kazuo ; Honda R&D Co. Ltd. Wako Research Center: Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'97*, Grenoble, France, September 1997
- Hirai et al. 1998** Hirai, Kazuo ; Hirose , Masato ; Haikawa , Yuji ; Takenaka , Toru: The Development of Humanoid Robot. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, Mai 1998
- Hirukawa et al. 2003** Hirukawa, H. et al.: Humanoid Robotics Platforms developed in HRP. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2003*, IEEE and VD/VDE Conference, Karlsruhe and Munich, 1-3.10.2003
- Hirzinger et al. 2000** Hirzinger, G. ; Butterfaß J. ; Fischer, M. ; Grebenstein, M. ; Hähnle, M. ; Liu, H.; Schäfer, I. ; Sporer, N.: A Mechatronics Approach to the design of light-weight arms and multifingered hands. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, April 2000
- Hirzinger et al. 2001** Hirzinger, G. ; Butterfaß J. ; Grebenstein, M.; Schäfer, I. ; Sporer, N. ; Fischer, M. ; Hong, L. ; Albu-Schäfer, A. ; Schedl, M. ; Neumann, P.: *Space Robotics – Driver for a new Mechatronic Generation of light-weight arms and multifingered hands*. In: *2001 IEEE/ASME International Conference Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings*, Como, Italia, 8-12 July 2001
- Hirzinger et al. 2002** Hirzinger, G. ; Sporer, N. ; Schedl, M. ; Butterfaß J. ; Grebenstein: Robotics and Mechatronics in Aerospace. In: *Proceedings of the IEEE 7th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, Maribor, Slovenia, July 3-5, 2002

- Hirzinger 2007** Hirzinger, G.: Schlüsseltechnologien Mechatronik – Von der Raumfahrt bis zur Medizin, In: *VDI/VDE, Mechatronik 2007- Innovative Produktentwicklung*, Wiesloch, 23.-24.5.2007 (VDI-Bericht Nr. 1971)
- Honda 2007** Honda, Homepage – URL: <http://world.honda.com/ASIMO/>
- Höpler 2005** Höpler, Robert: *A Unifying Objectoriented Methodology to Consolidate Multibody Dynamics in Robot Control*. München, 2005, ISBN 3-18-505408-3 (VDI Fortschritt-Bericht)
- Hubka 1984** Hubka, Vlademir: *Theorie Technischer Systeme, Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. Berlin: Springer 1984, ISBN 3-540-12953-7
- Isermann 1993** Isermann, Rolf: Integrierte Mechanisch-Elektronische Systeme – Aufgaben, Konzepte, Forschungsansätze. In: *Fachtagung Integrierte Mechanisch-Elektronische Systeme*, Darmstadt, 2. und 3. März 1993
- Isermann 1999** Isermann, Rolf: *Mechatronische Systeme – Grundlagen*. Berlin: Springer, 1999, ISBN 3-540-64725-2
- Janocha 1992** Janocha, Hartmut (Hrsg.): *Aktoren, Grundlagen und Anwendungen*, Berlin: Springer, 1992, ISBN 3-540-54707-X
- Jürgens et al. 1989** Jürgens, H. W. ; Aune, I. A. ; Pieper, U.: *Internationaler anthropometrischer Datenatlas*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz – Forschung – Fb 587, Wissenschaftsverlag NW, Dortmund 1989, ISBN 3-88 314-910-1
- Kagami et al. 2001** Kagami, Satoshi ; Nishiwaki, Koichi ; Kuffner Jr., James ; Kuniyoshi, Yasuo ; Inaba, Masayuki ; Inoue, Hirochika: Design and Implementation of Software Research Platform for Humanoid Robotics : H7. In: *International Conference in Humanoid Robots - Humanoids 2001*, 22-24 November, 2001, Waseda University, Tokyo, Japan
- Kagami et al. 2003** Kagami, S. et al.: Measurement and Comparison of Humanoid H7 Walking with Human Being. In: *IEEE International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2003*, Karlsruhe and Munich, October, 1-3, 2003,
- Kallenbach et al. 1997** Kallenbach, E. ; Birli, O. ; Saffert, E. ; Schäffel, C.: *Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte, Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Moers, Germany, 10.-12. März 1997, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997 (VDI-Bericht 1315)
- Kallenbach et al. 2001** Kallenbach, E. ; Zöppig, V. ; Birli, O. ; Feindt, K. ; Ströhla, T. ; Saffert, E. ; Schmidt, J.: Integration mechatronischer Systeme. In: *Innovative Produktentwicklung - 4. VDI Mechatronik Tagung 2001*, 12./13. September 2001, Mannheim
- Kapandji 1985** Kapandji, I. A.: *Funktionelle Anatomie, Schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik*. Band 3, Rumpf und Wirbelsäule, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1985
- Kargov et al. 2006** Kargov, Artem ; Pylatiuk, Christian ; Klosek, Heinrich ; Oberle, Reinhold ; Schulz, Stefan: Modularly designed lightweight anthropomorphic robot hand. In: *2006 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems September 3-6, 2006*, Heidelberg, Germany
- Kawada 2006** Kawada Industries, Inc.: URL: http://www.kawada.co.jp/global/ams/hrp_2.html, 2006

- Koller 1978** Koller, R.: *Funktionsanalyse technischer Systeme und Erstellung von Hilfsmitteln zur Produktplanung und -entwicklung*, 1978.
- Koreimann 1972** Koreimann, Dieter: *Systemanalyse*. Berlin: Walter de Gruyter, 1972, ISBN 3-11-003809-9
- Lindemann 2006** Lindemann, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte, Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 2. bearbeitete Auflage, Berlin: Springer, 2006, ISBN 3-540-37435-3
- Lippold 2000** Lippold, Christian: *Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme*. Ruhr- Universität Bochum, (Diss.), Fakultät für Maschinenbau, (Diss.), 2000
- Ly et al. 2004** Ly, D. N; Regenstein, K. ; Asfour, T. ; Dillmann, R.: A modular and distributed embedded control architecture for humanoid robots. In: *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004*. (IROS 2004), 2004 IEEE/RSJ , Sendai International Center, Sendai, Japan, page(s): 2775- 2780 vol.3, September 28 – October 2, 2004
- Matthiesen 2002** Matthiesen, Sven: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, (Diss.), 2002, ISSN 1615-8113
- Mikkola 2001** Mikkola, Julianna, Hsuan: Modularity and Interface Management: The case of Schindler Elevators. In: *DRUID 2001 Winter Conference*, Korsør, Denmark, January 17-19, 2001
- Möhringer 2004** Möhringer, Stefen: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Heinz Nixdorf Institut Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, (Habil.), 2004
- Möller et al 2003** Möller, Bjorn ; Andersson, Sören ; Wikander, Jan: Modularisation of mechatronic mechanism with dependent degrees of freedom. In: *International Conference on engineering design*, ICED 03, Stockholm, August 19-21, 2003
- Nakamura 1991** Nakamura, Y.: *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*. Addison Wesley Publishing Company, 1991
- Neudörfer 2005** Neudörfer, Alfred: *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte, Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie*. 3. Aufl., Springer, 2005, ISBN: 978-3-540-21218-8
- Nishiwaki et al 2000** Nishiwaki, K. ; Sugihara, T. ; Kagami, S. ; Kanehiro, F. ; Inabe, M. ; Inoue, H.: Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot : H6. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (IROS), Takamatsu/Japan, 2000
- Oestereich 2001** Oestereich, Bernd: *Objektorientierte Softwareentwicklung, Analyse und Design mit der Unified Modelling Language*. 5. Auflage, München : Oldenburg Verlag, 2001, ISBN 3-486-25573-8
- Ott et al 2006** Ott, Ch. et al.: A Humanoid Two-Arm System for Dexterous Manipulation. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2006*, IEEE-RAS, Genova, Italia, December 2006

- Øystein 2003** Øystein, E.: *Modular product development*. A review of modularization objectives as well as techniques for identifying modular product architectures, presented in a unified model. Part of a product design course at the department of product design engineering at the Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2003
- Pahl et al 2004** Pahl, G. ; Beitz, W. ; Feldhusen, J. ; Grote, K.H.: *Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. 6. Auflage, Berlin: Springer, 2004 ISBN 3-540-22048-8
- Park et al 2004** Park, Ill-Woo ; Kim, Jung-Yup ; Park, Seo-Wook ; Oh, Jun-Ho: Development of Humanoid Robot Platform KHR-2 (KAIST Humanoid Robot - 2). In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2004*, IEEE-RAS/RSJ, Santa Monica, Los Angeles, USA, 10-12 November 2004
- Park et al 2005** Park, Ill-Woo ; Kim, Jung-Yup ; Park, Seo-Wook ; Oh, Jun-Ho: Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot-3: HUBO). In: *5th International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2005*, IEEE-RAS, Tsukuba, Japan, 5-7.12.2005
- Patzak 1982** Patzak, G.: *Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme, Grundlagen, Methoden, Technik*, Berlin: Springer, 1982 ISBN 3-540-11783-0
- Rauber 1987** Rauber; Kopsch: *Anatomie des Menschen, Band I, Bewegungsapparat*. Lehrbuch und Atlas, Band I Bewegungsapparat, Stuttgart: Georg Thieme, 1987
- Regenstein et al 2007** Regenstein, K. ; Kerscher, T. ; Birkenhofer, C. ; Asfour, T. ; Zöllner, M. ; Dillmann, R.: Universal Controller Module (UCoM) – component of a modular concept in robotic systems. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, ISIE Centro Cultural and Centro Social Caixanova - Vigo, Spain, June 4-7, 2007
- Robonaut 2007** Johnson Space Center, Robonaut: *Homepage*, 2007, URL: <http://robonaut.jsc.nasa.gov/>
- Roebuck et al. 1975** Roebuck, J. A. ; Kroemer, K. H. E. ; Thomson, W. G.: *Engineering Anthropometry Methods*. Wiley Series in Human Factors, New York: John Wiley & Sons, 1975, ISBN 0-471-72975-2
- Rumbaugh et al. 1993** Rumbaugh, J. ; Blaha, M. ; Premerlani, W. ; Eddy, F. ; Lorenzen, W.: *Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen*. Hanser Verlag, 1993, ISBN 3446175202
- Saak 2006** Saak, Marcus: *Entwicklung eines Konzeptes und eines Prototypen für ein rechnergestütztes Werkzeug zum effizienten Einsatz der Problemlösungsmethodik „Spalten“*. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, (Diss.), 2006, ISSN 1615-8 113
- Sarcos 2007** Sarcos: *Homepage*, 2007, URL: <http://www.sarcos.com/>
- Sauter 2005** Sauter, Christian: *Methodische Aufgabenklärung, Konzeption und Entwurf eines modular aufgebauten Torsos für einen Humanoiden Roboter mit 3 Freiheitsgraden in der Hüfte*. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, (Diplomarbeit), 2005
- Schäfer 2000** Schäfer, Christian: *Entwurf eines anthropomorphen Roboterarms: Kinematik, Arbeitsraumanalyse, Softwaremodellierung*. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik, (Diss.), 2000

- Schmidt 2003** Schmidt, Winfried: *Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Fortschritt-Bericht VDI, Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, (Diss.), Oktober 2003
- Schulz 2003** Schulz, Stefan: *Eine neue Adaptiv-Hand-Prothese auf der Basis flexibler Fluidaktoren*. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, (Diss.), 2003
- Schumann / Grotte 1997** Schumann, S. ; Grotte K.-H.: Methodisches 3D-Modellieren – Der bessere Weg zum Produktmodell. In: 3. *Magdeburger Maschinenbau-Tage, Entwicklungsmethoden und -Entwicklungsprozesse im Maschinenbau*, 11.-13. September 1997
- Schünke et al 2004** Schünke, M. ; Schulte, E. ; Schumacher, U.: *PROMETHEUS, Lernatlas der Anatomie. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. Thieme Stuttgart, ISBN 978-3-13-19521-4, 2004
- Schyr 2005** Schyr, Christian: *Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung*. Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), (Diss.), 2005, ISSN 1615-8113
- Seherr-Thoss et al 2002** Seherr-Thoss, H.-Ch. ; Schmelz F. ; Aucktor, E.: *Gelenke und Gelenkwellen, Berechnung, Gestaltung, Anwendung*. 2. Auflage, Springer Verlag, 2002 ISBN 3-540-41759-1
- SFB588**: *Homepage des Sonderforschungsbereiches 588: Lernende und kooperierende multimodale Humanoide Roboter*, URL: <http://www.sfb588.uni-karlsruhe.de/>
- Simon 1969** Simon, Herbert, A.: *Die Wissenschaft vom Künstlichen*. Springer Verlag/Wien, 1994, vollständige Übersetzung der Originalausgabe, The Sciences of the Artificial, Massachusetts Institut of Technology, 1969
- Suominen 2003** Suominen, Jyrki: *Pro-Robot: Paving the Road for Humanoid Robots*. FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, 2003
- Tondu 2005** Tondu, Bertrand: *Modelling of the Shoulder Complex and Application to the Design of Upper Extremities for Humanoid Robots*. In: *5th International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2005*, IEEE-RAS, December 5-7, 2005 Tsukuba, Japan
- VDI-Richtlinie 2206** Verein Deutscher Ingenieure – Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. *VDI-Richtlinie*, Juni 2004
- VDI-Richtlinie 2221** Verein Deutscher Ingenieure – Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb: *Methodik zum Entwickeln und konstruieren technischer Systeme und Produkte*. *VDI-Richtlinie*, Mai 1993
- VDI-Richtlinie 2222** Verein Deutscher Ingenieure – Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb: *Konstruktionsmethodik, Konzipieren technischer Produkte*. *VDI-Richtlinie*, Mai 1977
- VDI-Richtlinie 2861** Verein Deutscher Ingenieure – Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb: *Montage- und Handhabungstechnik, Kenngrößen für Industrieroboter Achsbezeichnungen*. *VDI-Richtlinie*, Blatt 1 und 2, Juni 1988
- Warnecke / Schraft 1990** Warnecke, H. J. ; Schraft, R. D.: *Industrieroboter. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Berlin: Springer, 1990

- Welp et al. 2001** Welp, E. G. ; Lippold, C. ; Bludau C.: *Ein System zur objektorientierten Modellierung mechatronischer Produktkonzepte (ModCoDe)*. 2001 (VDI-Bericht Nr. 1631)
- Woernle 1987** Woernle, C.: *Ein systematisches Verfahren für die Rücktransformation bei Industrierobotern. Robotersysteme*, 1987
- Yokoi et al. 2001** Yokoi, Kazuhito ; Kanehiro, Fumio ; Kaneko, Kenji ; Fujiwara, Kiyoshi ; Kajita, Shuji ; Hirukawa, Hirohisa: A Humanoid Robot Controlled by AIST Software. In: *Humanoids 2001, International Conference in Humanoid Robots*, 22-24 November, 2001, Waseda University, Tokyo, Japan
- Yokoi et al. 2003** Yokoi, K. et al.: Humanoid Robots Application in HRP. In: *International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2003*, IEEE and VDI/VDE Conference, 1-3.10. 2003, Karlsruhe and Munich
- Zecca 2004** Zecca, M. et al.: On the development of the emotion expression humanoid robot WE-4R11 with RCH-1: In: *4th International Conference on Humanoid Robots - Humanoids 2004* IEEE/RAS, Volume 1, 10-12 Nov. 2004 Page(s):235 - 252 Vol. 1
- Zentner et al. 2005** Zentner, J. ; Bertram, T. ; Freudenberg, H. ; Maißer, P.: Konzept einer Simulationsplattform zum domänenübergreifenden modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme. In: *Tagungsband VDI Mechatronik 2005*, Wiesloch
- Züst 1997** Züst, Rainer: *Einstieg ins Systems Engineering, Systematisch denken, handeln und umsetzen*. Zürich: Orell Füssli , 1997, ISBN 3-85743-986-6

11 Anhang

11.1 Three laws of robotics

In dem Buch „I Robot“ von Isaac Asimov¹³² unterliegen die Roboter drei grundlegenden Gesetzen. Aufgrund dieser Gesetze sollen sich die Roboter unproblematisch gegenüber dem Menschen verhalten. Die Gewichtung dieser Gesetze entspricht der Aufzählreihenfolge.

1. A robot may not injure a human being, or, through inaction, allow a human being to come to harm.
2. A robot must obey orders given it by human beings except where such orders would conflict with the First Law.
3. A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Law.

Später fügte Asimov das nullte Gesetz hinzu. Dieses soll als fundamentales Gesetz sicherstellen, dass sich der Roboter in die menschliche Gemeinschaft integriert.

0. A robot may not injure humanity, or, through inaction, allow humanity to come to harm.

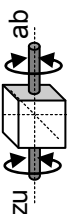
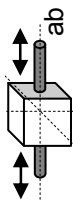
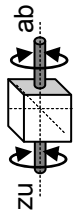
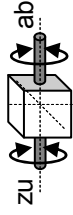
¹³² Asimov 1950

11.2 Klassen der Systemelemente im Antriebsstrang

Bemerkung zu den Tabellen:

Die qualitativen Angaben beziehen sich auf die Funktionen, Schnittstellen und Eigenschaften der Systemelemente des Antriebsstrangs.

Systemelemente ohne passive Drehachse

Name	Welle/Hohlwelle	Stange	Planetengetriebe	Harmonic Drive
Grafik (zu: Antrieb, ab: Abtrieb; un/abh.: Abtrieb zu Antrieb unabhängig bzw. abhängiger bezüglich passive DoF)				
Lage Zugang zu Abtrieb (Nullstellung)	koaxial	koaxial	koaxial	koaxial
Leistung Eingang – Leistung Ausgang	$M \times \omega$ (beide Richt.) - $M \times \omega$	$F \times v$ (beide Richt.) - $F \times v$	$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$	$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$
Generalisierte Untersetzung (abhängig von)	keine Untersetzung	keine Untersetzung	große Untersetzung (Durchmesser Teilkreise)	große Untersetzung (Zähnezahl, Außendurchmesser)
Überbrückung von Drehachse(n)	—	—	—	—
Antrieb durch Abtrieb	ja	ja	ja	schlecht, da selbsthemmend
Interne Kabelführung	ja (koaxial) wenn interne hohl	ja (koaxial) wenn interne hohl	nein (ja nur durch die Umlenkrolle)	ja (koaxial) bei interner Hohlwelle
selbsthemmend - gedämpft	nein (umkehrbar)	nein (umkehrbar)	gedämpft/umkehrbar	gedämpft
externe/interne Kraft-/Momentenmessung, Kraftniveau wie An-/Abtrieb (verstärkend)	intern, best. Dehnung an Oberfl.	Intern, best. Dehnung an Oberfl.	Lagerkräfte vom Hohlrad (extern) Kraftniveau zwischen Zu- und Ab.	nein
Verhältnis Bauraum zu übertragbarer Leistung (qualitativ)	klein	klein	groß	groß
Gewicht (qualitativ)	niedrig	niedrig	hoch	niedrig
Spiel (qualitativ)	nein	nein	mittel	nein
Reibung bzw. Dämpfung (abhängig von) (qualitativ)	nein	nein	mittel - hoch	mittel
Elastizität (qualitativ)	gering	gering	gering	mittel
Bemerkung			auch mehrere Übersetzungsstufen hintereinander möglich	Einsatz als Präzisionsübersetzung
Passive Freiheitsgrade				
Lage pass. Achse 1 zum Antrieb				
max. Winkel/Weg-Bewegung				
Beschränkungen				
Bemerkung				
Lage pass. Achse 2 zum Antrieb				
max. Winkel/Weg-Bewegung				
Beschränkungen				
Bemerkung				

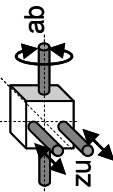
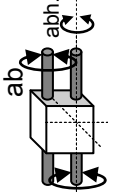
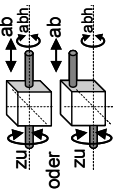
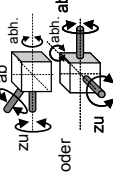
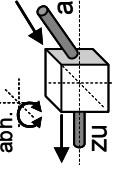
Zahnriemen um eine Umlenkrolle geführt, linearer Antrieb 	orthogonal Versatz
	$F \times v$ (beide Richt.) - $M \times \omega$
	kleine Unterersetzung (Durchmesser-Umlaufrolle)
	—
	2 mal lin Zug ↔ rot
	nein (ja nur durch die Umlenkrolle)
	nein /umkehrbar
	nein
	mittel
	klein - mittel
	nein
	klein
gering	
Zahnriemen unter Vorspannung	

Tabelle 11.2-1: Systemelemente im Antriebsstrang ohne passive Drehachse

Systemelemente mit einer passiven abhängigen Drehachse

Name	Stirnradpaar	Gewindespindel (Kugelumlaufspindel)	Kegelradpaar	Seilzug auf Umlenkrolle
Grafik (abh./un.: ab-/unabhängiger DoF von Zu zu Ab) 				
Lage Zugang zu Abtrieb (Nullstellung)	parallel mit Versatz	koaxial/parallel Versatz.	orthogonal/schiefwinklig	tangential an Kreis
Leistung Eingang – Leistung Ausgang	$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$	$M \times v$ (beide Richt.) - $F \times v$	$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$	$F \times v$ (eine Richt.) - $F \times v$
Generalisierte Unterersetzung (abhängig von)	keine bis kleine Unterersetzung (Durchm. Teilkreise)	mittl. bis große Unterersetzung (Durchm. Umlaufrolle Abtrieb)	keine bis kleine Unterersetzung (Durchm. Zahnräder)	keine Unterersetzung
Überbrückung einer Drehachse (abhängig)	Roll mit Unwucht	Roll (abhängig)	Revolver/Roll	nicht fluchtendes Gelenk/pitch
Antrieb durch Abtrieb	ja (beide Richtungen)	ja (abhängig von der Steigung) (beide Richtungen)	ja (beide Richtungen)	ja (eine Richtung)
Interne Kabelführung	nein (ja nur durch die Zahnräder)	nein	nein (ja nur durch die Zahnräder)	nein (ja nur durch die Umlenkrolle)
selbsthemmend - gedämpft	nein	je nach Steigung gedämpft oder haltend	nein	nein
externe/interne Kraft-/Momentenmessung, Kraftniveau wie An-/Abtrieb (verstärkend)	nein	Lagerkräfte der Spindel (extern) Kraftniveau wie Abgang	nein	Aufhängung Umlenkrolle (extern) belast. Abhäng. von Umlenkwinkel
Leistung (qualitativ)	niedrig	mittel	mittel	hoch
Gewicht (qualitativ)	hoch	mittel	mittel	niedrig
Spiel (qualitativ)	mittel	ja (wenig)	ja (nein)	nein
Reibung bzw. Dämpfung (abhängig von) (qualitativ)	wenig	hoch/wenig, je nach Lagerung	hoch/wenig, je nach Lagerung	nein
Elastizität (qualitativ)	gering	gering	gering	mittel
Bemerkung				Seilzug unter Vorspannung
Passive Freiheitsgrade				
Lage pass. Achse 1 zum Antrieb	Zylindrisch (abhängig)	Zylindrisch (abhängig)	Revolver – kegelig (abhängig)	Pitch – tangential (abhängig)
max. Winkel/Weg-Bewegung	>360°	>360°	>360°	0 - 180°
Beschränkungen	Umgebung	Umgebung	Umgebung	Umgebung
Bemerkung	abhängig	abhängig	abhängig	abhängig
Lage pass. Achse 2 zum Antrieb				
max. Winkel/Weg-Bewegung				
Beschränkungen				
Bemerkung				

Kette auf zwei Kettenblättern	Zahnrriemen um zwei Umlenkrollen	Seilzug um zwei Umlenkrollen
parallel Versatz	parallel Versatz	parallel Versatz
$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$	$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$	$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$
keine bis kleine Unterersetzung (Durchm. Kettenblatt Abtrieb)	keine - kleine Unterersetzung (Durchm. Umlenkrolle Abtrieb)	keine bis kleine Unterersetzung (Durchm. Umlenkrolle Abtrieb)
Roll mit Unwucht	Roll mit Unwucht	Roll mit Unwucht
ja (beide Richtungen)	ja (beide Richtungen)	ja (beide Richtungen)
nein (ja nur durch die Kettenblätter)	nein (ja nur durch die Umlenkrollen)	nein (ja nur durch die Umlenkrollen)
nein /umkehrbar	nein /umkehrbar	nein
nein	nein	nein
mittel - hoch	mittel	mittel
mittel	niedrig	niedrig
ja (etwas)	nein	nein
wenig	wenig	wenig
gering	gering	hoch
Kette unter Vorspannung	Zahnrriemen unter Vorspannung	Seilzug unter Vorspannung
zylindrisch (abhängig)	zylindrisch (abhängig)	zylindrisch (abhängig)
>360°	>360°	>360°
Umgebung	Umgebung	Umgebung
abhängig	abhängig	abhängig

Tabelle 11.2-2: Systemelemente im Antriebsstrang mit einer passiven abhängigen Drehachse

Systemelemente mit zwei passiven abhängigen Drehachsen

Kardangelen/ Kreuzgelenk	Name	Passive Freiheitsgrade	
		Lage pass. Achse 1 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung
	Grafik (abh./un.: ab-/unabhängiger DoF von Zu zu Ab)		
koaxial	Lage Zugang zu Abtrieb (Nullstellung)		
$M \times \omega$ (beide Richt.) - $M \times \omega$	Leistung Eingang – Leistung Ausgang		
nein	Generalisierte Unterersetzung (abhängig von)		
Zwei nicht fluchtende Gelenke (Pitch – Yaw)	Überbrückung zweier Drehachsen (abhängig)		
ja (beide Richtungen)	Antrieb durch Abtrieb		
ja (koaxial) wenn intern hohl	Interne Kabelführung		
nein / umkehrbar	selbsthemmend - gedämpft		
nein	externe/interne Kraft-/Momentenmessung, Kraftniveau wie An-/Abtrieb (verstärkend)		
gering	Verhältnis Bauraum zu übertragbarer Leistung (qualitativ)		
mittel	Gewicht (qualitativ)		
nein / klein	Spiel (qualitativ)		
wenig	Reibung bzw. Dämpfung (abhängig von) (qualitativ)		
mittel - wenig	Elastizität (qualitativ)		
Gelenke mit Lagerung	Bemerkung		
Pitch (abh. Kardanfehler)	Lage pass. Achse 1 zum Antrieb		
< 45°	max. Winkel/Weg-Bewegung		
Interne Kollision	Beschränkungen		
beide pass. DoF werden benötigt	Bemerkung		
Yaw (abh. Kardanfehler)	Lage pass. Achse 2 zum Antrieb		
< 45°	max. Winkel/Weg-Bewegung		
interne Kollision	Beschränkungen		
beide pass. DoF werden benötigt	Bemerkung		

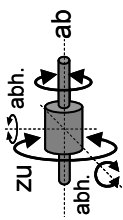
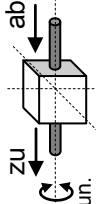
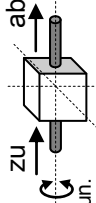
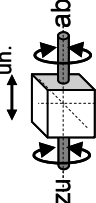
Welle mit kardanischem Antrieb	
	koaxial
	$M \times \omega$ (beide Richt.) - $M \times \omega$
	nein
	zwei nicht fluchtende Gelenke (Pitch – Yaw)
	ja (beide Richtungen)
	nein (ja nur durch die Welle, wenn hohl)
	nein / umkehrbar
	nein
	mittel
	hoch
	nein / klein
	wenig
	mittel - wenig
	Gelenke mit Lagerung
	Pitch (abh. Kardanfehler)
	$< 35^\circ$
	interne Kollision
	beide pass. DoF werden benötigt
	Yaw (abh. Kardanfehler)
	$< 35^\circ$
	interne Kollision
	beide pass. DoF werden benötigt

Tabelle 11.2-3: Systemelemente im Antriebsstrang mit zwei passiven abhängigen Drehachsen

Systemelemente mit einer passiven unabhängigen Drehachse

Name	Freier Seilzug	Welle mit Axiallager	Zwei ineinander verschiebbare Wellen	Passive Freiheitsgrade			
				Lage pass. Achse 1 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung
Grafik (abh./un.: ab-/unabhängiger DoF von Zu zu Ab)							
Lage Zugang zu Abtrieb (Nullstellung)	koaxial	koaxial	koaxial				
Leistung Eingang – Leistung Ausgang	$F \times v$ (eine Richt.) - $F \times v$	$F \times v$ (eine Richt.) - $F \times v$	$M \times \omega$ (beide Richt.) - $M \times \omega$				
Generalisierte Untersezung (abhängig von)	nein	nein	nein				
Überbrückung einer Drehachse (unab.)	fluchtendes Gelenk - Roll	nicht fluchtendes Gelenk - Roll	Längenausgleich linear				
Antrieb durch Abtrieb	ja (eine Richtungen)	ja (eine Richtungen)	ja (beide Richtungen)				
Interne Kabelführung	nein	ja (koaxial) wenn intern hohl	ja (beide Richtungen)				
selbsthemmend - gedämpft	nein	nein	ja (Hohlwelle)				
externe/interne Kraft-/Momentenmessung, Kratniveau wie An-/Abtrieb (verstärkend)	Anschluss einer Kraftniveau keine Verstärkung	nein	nein				
Verhältnis Bauraum zu übertragbarer Leistung (qualitativ)	niedrig	mittel	hoch – mittel				
Gewicht (qualitativ)	niedrig	mittel	mittel				
Spiel (qualitativ)	nein	nein	nein				
Reibung bzw. Dämpfung (abhängig von) (qualitativ)	nein	nein	nein				
Elastizität (qualitativ)	hoch	gering	Klein				
Bemerkung	Seilzug unter Vorspannung		bei Teleskopwelle ist Δl_{max} größer				
	Roll (unabhängig)	Roll (unabhängig)	linear (unabhängig)				
	$> 360^\circ$	$> 360^\circ$	$< \text{halbe Länge der Welle}$				
	Umgebung	Umgebung	Länge der Welle				
	kleine Längenänderung durch die Torsion des Seils						
	Lage pass. Achse 2 zum Antrieb						
	max. Winkel/Weg-Bewegung						
	Beschränkungen						
	Bemerkung						
	Lage pass. Achse 1 zum Antrieb						
	max. Winkel/Weg-Bewegung						
	Beschränkungen						
	Bemerkung						

Beidseitig wirkender hydr. Zylinder	<p>ab: p·V·A</p>	frei
		$F \times v$ (eine/beide Rl.) – $p \times v \times A$
		mittlere Untersezung
		Rotation vom Zugang - Roll
		ja (beide Richtungen)
		nein
		gedämpft
		DMS an Kolbenstange (Zugabg)
		Ja (DMS an Kolbenstange)
		hoch
mittel		
nein		
mittel - hoch		
Roll (unabhängig)		
groß		
Umgebung		

Tabelle 11.2-4: Systemelemente im Antriebsstrang mit einer passiven unabhängigen Drehachse

Systemelemente mit zwei passiven unabhängigen Drehachsen

Name	Homokinisches Gelenk	Passive Freiheitsgrade																						
		Lage pass. Achse 1 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung	Lage pass. Achse 2 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung															
Grafik (abh./un.: ab-/unabhängiger DoF von Zu zu Ab)		koaxial	$M \times \omega$ (beide Richt.) - $M \times \omega$	nein	Zwei nicht fluchtende Gelenke (Pitch – Yaw)	Ja (beide Richtungen)	Ja (koaxial) wenn intern hohl	nein	selbsthemmend - gedämpft	externe/interne Kraft-/Momentenmessung, Kraftniveau wie An-/Abtrieb (verstärkend)	Verhältnis Bauraum zu übertragbarer Leistung (qualitativ)	Gewicht (qualitativ)	Spiel (qualitativ)	Reibung bzw. Dämpfung (abhängig von) (qualitativ)	Elastizität (qualitativ)	Bemerkung	Pitch (unabhängig)	<35°	interne Kollision	Bemerkung	Yaw (unabhängig)	<35°	interne Kollision	Bemerkung
Lage Zugang zu Abtrieb (Nullstellung)	Leistung Eingang – Leistung Ausgang	Generalisierte Untersezung (abhängig von)	Überbrückung zweier Drehachsen (unabhängig)	Antrieb durch Abtrieb	Interne Kabelführung	selbsthemmend - gedämpft	externe/interne Kraft-/Momentenmessung, Kraftniveau wie An-/Abtrieb (verstärkend)	Verhältnis Bauraum zu übertragbarer Leistung (qualitativ)	Gewicht (qualitativ)	Spiel (qualitativ)	Reibung bzw. Dämpfung (abhängig von) (qualitativ)	Elastizität (qualitativ)	Bemerkung	Lage pass. Achse 1 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung	Lage pass. Achse 2 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung			

Tabelle 11.2-5: Systemelemente im Antriebsstrang mit zwei passiven unabhängigen Drehachsen

Flexible Systemelemente

Name	Seilzug in Bowdenzug	Passive Freiheitsgrade																				
		Lage pass. Achse 1 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung	Lage pass. Achse 2 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung													
Grafik (abh./un.: ab-/unabhängiger DoF von Zu zu Ab)		koaxial	lin, Zug (eine Richtung) - lin	nein	frei (unabhängig)	ja (eine Richtungen)	nein	selbsthemmend, abhängig von Biegewinkel und Biegeradius	nein	hoch (exponentiell zu Biegewinkel)	hoch	Bemerkung	frei Biegung (unabhängig)	< 180°	min. Biegeradius und minimaler Biegewinkel	Bemerkung	Lage pass. Achse 2 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung		
Lage Zugang zu Abtrieb (Nullstellung)	Leistung Eingang – Leistung Ausgang	Generalisierte Untersezung (abhängig von)	Passive Bewegung rel. zum Zugang	Flexibel Überbr. von Bewegungen (unabh.)	Antrieb durch Abtrieb	Interne Kabelführung	selbsthemmend - gedämpft	externe/interne Kraft-/Momentenmessung, Kraftniveau wie An-/Abtrieb (verstärkend)	Verhältnis Bauraum zu übertragbarer Leistung (qualitativ)	Gewicht (qualitativ)	Spiel (qualitativ)	Reibung bzw. Dämpfung (abhängig von) (qualitativ)	Elastizität (qualitativ)	Bemerkung	Lage pass. Achse 1 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung	Lage pass. Achse 2 zum Antrieb	max. Winkel/Weg-Bewegung	Beschränkungen	Bemerkung

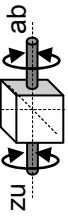
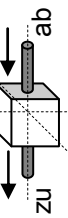
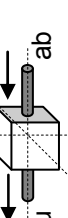
Biegsame Welle	Hydraulik/Pneumatik- leitung (flexibel)	Seilzug in gelenkig verbundenen starren Rohren (Nokon)
		
koaxial	frei	koaxial
$M_1 \times \omega_1$ (beide Richt.) - $M_2 \times \omega_2$	Druck, Weg (einseitig) – Druck, Weg	lin, Zug (eine Richtung) - lin
nein	keine bis große Unter-/Übersetzung Abhängig von der Kolbenfläche	nein
frei (unabhängig)	frei (unabhängig)	frei (unabhängig)
ja (beide Richtungen)	ja (eine Richtungen)	ja (eine Richtungen)
ja (koaxial) wenn intern hohl	nein	nein
nein	nein	selbsthemmend, abhängig von Biegewinkel und Biegeradius
nein	ja, Druckmessung (intern)	nein
mittel	hoch	klein
niedrig	hoch	niedrig
nein	nein	nein
mittel	mittel	mittel - hoch (exponentiell zu Biegewinkel)
sehr hoch	je nach Leitungsmaterial schwierig abzudichten oder Leckage Ausgleich	hoch
frei Biegung (unabhängig)	frei beweglich (unabhängig)	nur geringe Zugkräfte
klein	frei	frei Biegung (unabhängig)
min Biegewinkel	Flexibilität Leitung	< 180°
		min. Biegeradius und minimaler Biegewinkel

Tabelle 11.2-6: Flexible Systemelemente im Antriebsstrang

11.3 Systemelemente im Arm III

Die Systeme humanoider Roboter sind aus Systemelementen aufgebaut, die einzeln, unter Angabe ihrer Eigenschaften, in der jeweiligen Klassierung abgelegt sind. In Tabelle 11.3-1-3 sind die Systemelemente des Arms III benannt, dessen Entwicklung in Kapitel 7 beschrieben wird.

Gelenkkomplex Schulter	Anordnung der Drehachsen: Roll-Pitch-Roll	
	Mehrfachgelenk: Torso + 2:(f.):1 + 2:(nf.):1 + 2:(f.):1 + Oberarmrohr	
	Gelenk 1	Aktor: Servomotor mit Encoder
		Antriebsstrang: separater Gelenkantrieb, 0 Gelenke überbrückt, unabhängig
		Systemelemente im Antriebsstrang: Zahnriemen mit zwei Umlenkrollen, HD-Getriebe, Hohlwelle
		Bestimmung des Antriebsmoments: interne Messung an der Oberfläche des Verformungskörpers; Systemelemente Antriebsstrang: Hohlwelle; Sensor: DMS
		Winkelmessung: Wirkflächen: rot., beide Wirkflächen senkrecht zur Drehachse, gegengerichtet, mit Durchgang; Sensor: berührungsloser optischer Winkelsensor
	Gelenk 2	Aktor: Servomotor mit Encoder
		Antriebsstrang: separater Gelenkantrieb, 0 Gelenke überbrückt, unabhängig
		Systemelemente im Antriebsstrang: Zahnriemen mit zwei Umlenkrollen, Schneckengetriebe
		Bestimmung des Antriebsmoments: externe Messung der Lagerkraft des Systemelements; Systemelemente Antriebsstrang: Schneckenwelle; Sensor: Kraftmessdose
		Winkelmessung: Wirkflächen: rot., beide Wirkflächen senkrecht zur Drehachse, gleichgerichtet, ohne Durchgang; Sensor: berührungsloser optischer Winkelsensor, Sensorhauptteil auf zusätzlicher Leitstützstruktur
	Gelenk.3	Aktor: Servomotor mit Encoder
		Antriebsstrang: separater Gelenkantrieb, 0 Gelenke überbrückt, unabhängig
		Systemelemente im Antriebsstrang: Zahnriemen mit zwei Umlenkrollen, Schneckengetriebe
Bestimmung des Antriebsmoments: Externe Messung der Lagerkraft des Systemelements; Systemelemente Antriebsstrang: Schneckenwelle; Sensor: Kraftmessdose		
Winkelmessung: Wirkflächen: rot., beide Wirkflächen parallel zur Drehachse , gegengerichtet mit Durchgang; Sensor: berührungsloser optischer Winkelsensor		

Tabelle 11.3-1: Systemelemente des Antriebsstrangs in der Schulter von Arm III

Gelenkkomplex Ellbogen	Anordnung der Drehachsen: Pitch-Roll	
	Mehrfachgelenk: Oberarmrohr + 2:(nf.):1 + 2:(f.):1 + Unterarmrohr	
	Gelenk 4	Aktor: Servomotor mit Encoder
		Antriebsstrang: separater Gelenkantrieb, Aktor in den Torso ausgelagert, unabhängig
		Systemelemente Antriebsstrang: HD-Getriebe, Seilzug mit zwei Umlenkrollen (Seilzug wird über Bowdenzüge und Umlenkrollen geführt)
		Bestimmung des Antriebsmoments: Interne Messung in zusätzlichem Systemelement Systemelemente Antriebsstrang: Zugkraft im Seilzug; Sensor: Kraftmessdose
		Winkelmessung: Wirkflächen: rot., beide Wirkflächen senkrecht zur Drehachse, gegengerichtet, mit Durchgang; Sensor: berührungsloser optischer Winkelsensor, Sensorhauptteil auf zusätzlicher Leitstützstruktur
	Gelenk 5	Aktor: Servomotor mit Encoder
		Antriebsstrang: separater Gelenkantrieb, Aktor in den Torso ausgelagert, unabhängig
		Systemelemente im Antriebsstrang: HD-Getriebe, Seilzug mit zwei Umlenkrollen (Seilzug wird über Bowdenzüge und Umlenkrollen geführt)
Bestimmung des Antriebsmoments: Interne Messung mit zusätzlichem Systemelement Systemelemente Antriebsstrang: Zugkraft im Seilzug; Sensor: Kraftmessdose		
Winkelmessung: Wirkflächen: rot., beide Wirkflächen senkrecht zur Drehachse, gegengerichtet, mit Durchgang; Sensor: berührungsloser optischer Winkelsensor, Sensorhauptteil auf zusätzlicher Leitstützstruktur		

Tabelle 11.3-2: Systemelemente des Antriebsstrangs im Ellbogen von Arm III

Gelenkkomplex Handgelenk	Anordnung der Drehachsen: Pitch-Yaw	
	Mehrfachgelenk: Unterarmrohr + 1:(nf.):2 + 1:(nf.):2 + Anschluss zur Hand	
	Gelenk 6	Aktor: Servomotor mit Encoder
		Antriebsstrang: separater Gelenkantrieb, 0 Gelenke überbrückt, unabhängig
		Systemelemente im Antriebsstrang: Kugelumlaufspindel, Seilzug mit zwei Umlenkrollen (Seilzug wird linear angetrieben)
		Bestimmung des Antriebsmoments: abtriebsseitige Kraftmessung im Anschluss zur Hand Sensor: 6 Achsen Momentenmessung
		Winkelmessung: Wirkflächen: rot., beide Wirkflächen senkrecht zur Drehachse, gleichgerichtet, ohne Durchgang; Sensor: Potentiometer
	Gelenk 7	Aktor: Servomotor mit Encoder
		Antriebsstrang: separater Gelenkantrieb, 1 nicht fluchtendes Gelenk überbrückt, abhängig (Kardanfehler)
		Systemelemente im Antriebsstrang: Kugelumlaufspindel, Zahnriemen mit zwei Umlenkrollen (Zahnriemen wird linear angetrieben), kardanisch angetriebene Welle
Bestimmung des Antriebsmoments: abtriebsseitige Kraftmessung im Anschluss zur Hand Sensor: 6 Achsen Kraftmessung		
Winkelmessung: Wirkflächen: rot., beide Wirkflächen senkrecht zur Drehachse mit Versatz, gegengerichtet, ohne Durchgang; Sensor: Potentiometer, Sensorhauptteil an zusätzlicher Leitstützstruktur		

Tabelle 11.3-3: Systemelemente des Antriebsstrangs im Handgelenk von Arm III

11.4 Glossar

Aktor: Hier wird der Begriff Aktor für einen Energiesteller benutzt, der eine Hilfsenergie und eine Stellgröße als Eingang und eine mechanische, bzw. fluidische Energie als Ausgangsgröße hat, die einem Einzelgelenk zugeordnet ist. Allgemein gilt, Aktoren dienen zur gezielten Beeinflussung von Zustandsgrößen in mechatronischen Systemen. Der Begriff „Aktor“ geht damit über den Begriff „Antrieb“ (engl. „actuator“) hinaus und umfasst alle Arten von Ausgabeelementen für Bewegungen und Kräfte¹³³.

Aktorik (Antrieb): Der gesamte Antrieb inklusive Steller und Antriebsstrang. Im Maschinenbau wird die Stelle einer Funktionseinheit, an der mechanische Leistung in Form einer Drehbewegung eingespeist bzw. eingeleitet wird, als Antrieb bezeichnet. Im Gegenzug wird die abgebende Seite Abtrieb genannt.

Antriebsstrang: Der Antriebsstrang verbindet den Aktor mit der im Technischen Gelenk bewegten Masse.

Dominierende Domäne: Eigenschaft von manchen multidisziplinären Systemen. Die Anteile aller Domänen weisen Wechselwirkungen zur dominierenden Domäne auf, wirken sich aber nicht unbedingt gegenseitig aufeinander aus. Leistungsfähige Entwicklungsmodelle und Werkzeuge der dominierenden Domäne werden verwendet, wobei die Auswirkungen der anderen physikalischen Substrukturen auf die dominierende Domäne abgebildet werden. Es werden die Auswirkungen auf die Domäne und nicht die Phänomene selber beschrieben¹³⁴.

Entwicklungsbezogene Modularisierung: Unterteilung des Systems in Module, die in der Entwicklung als Einheiten zu betrachten sind und durch Anpassung in anderen Systemen genutzt werden können. Diese Module sind keine räumlich getrennten Einheiten.

Einzelgelenk: Ein Einzelgelenk besteht aus zwei Segmenten der Tragstruktur, die gelenkig miteinander verbunden sind. Hierbei handelt es sich um Drehgelenke mit einem Freiheitsgrad oder Kugelgelenke mit drei Freiheitsgraden. Einzelgelenke sind Teil der Mechanik.

Flexible Systemelemente Antriebsstrang: Unter diesem Begriff werden Systemelemente zusammengefasst, die zwei starre Segmente des Antriebsstrangs mit einem Gelenk verbinden, das drei passive rotatorische Achsen aufweist, die sich in einem Punkt schneiden und Systemelemente, deren beide Enden sich um sechs Freiheitsgrade frei zueinander bewegen können. Die übertragene Antriebsleistung ist unabhängig von den passiven Bewegungen.

Fluchtendes Gelenk: Gelenk, in dem die Drehachse und die Körperachsen der Anschlusssegmente parallel verlaufen.

Führender Antrieb: Ein führender Antrieb ist von der Kinematik die er antreibt unabhängig und hat zu dieser nur an zwei Stellen Kontakt. Durch eine Veränderung der räumlichen Lage dieser Kontaktstelle wird die geführte Kinematik ausgerichtet. Der Antrieb führt die Kinematik in die neue Position.

Funktion (Wirkeigenschaft): Eine Funktion ist eine lösungsneutral beschriebene Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems¹³⁵.

¹³³ VDI-Richtlinie 2206

¹³⁴ Zentner et al. 2005

¹³⁵ Mathiesen 2002

Funktionale Integration: Mechanische und elektrische Komponenten sind aufgrund der zwischen ihnen bestehenden Stoff-, Energie- und Informationsflüsse gekoppelt. Die Komponenten müssen nicht räumlich integriert sein.

Funktionseinheit: Funktionseinheiten, so wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, sind den Bereichen Technische Gelenke, Aktorik, Sensorik und Regelungssystem zugeordnet. Funktionseinheiten sind dadurch gekennzeichnet, dass alle daran beteiligten Systemelemente gemeinsam eine oder mehrere Aufgaben verrichten. Diese Einheiten verfügen untereinander über ausgeprägte Wechselwirkungen. Funktionseinheiten müssen keine räumliche Einheit bilden.

Allgemein: Zusammenfassung mehrerer elementarer Funktionen zu einer immateriellen Einheit; eine Funktionseinheit kann, muss aber nicht, mittels einer Baueinheit (einer Maschine, einer Baugruppe oder eines Bauteils) realisiert sein¹³⁶.

Gekoppelter Gelenkantrieb: Antriebe, bei denen die Antriebsstränge zwischen den Aktoren und den Gelenken gekoppelt sind (vgl. separater Gelenkantrieb).

Gelenk: Ein Gelenk ist eine bewegliche Verbindung von mindestens zwei Körpern.

Gelenkantrieb: Der Gelenkantrieb überträgt die Antriebsleitung zu dem anzutreibenden Gelenk, und der Antriebsstrang passt sich hierbei den Bewegungen der Tragstruktur an, in oder an der er verlegt ist.

Gelenkeinheiten: Teil eines Moduls/Gelenkkomplexes mit einem Drehgelenk oder einem Kugelgelenk. Zu der Gelenkeinheit gehören alle Funktionseinheiten, die direkt mit dem Gelenk verknüpft sind, wobei es sich zumeist um den Antrieb des Gelenks, die zugehörige Sensorik und das Regelungssystem handelt.

Gelenkkomplex (Modul): Kombination von mindestens einer Gelenkeinheit, deren Drehachsen sich in einem Punkt schneiden. Gelenkkomplexe sind die kleinsten Einheiten, die eine Unterteilung anhand der ausgeprägteren internen als externen Wechselwirkungen ermöglichen. Diese Art von Teilsystemen ermöglicht eine entwicklungsbezogene Modularisierung des Gesamtsystems. An Gelenkkomplexen können Anteile aller Domänen enthalten sein. Im humanoiden Roboter werden die Module von einer oder mehreren Gelenkeinheiten gebildet.

Gelenkrechner: Controller, Wandler und Leistungseinheit, die zusammen an einem Einzelgelenk wirken.

Gesamtsystem: Wird oft auch als System bezeichnet und stellt die Kombination aller Teilsysteme dar, die zusammen die gewünschte Funktionalität des Systems bereitstellen. Dies ist der in der jeweiligen Unterteilung gewählte Betrachtungsstandpunkt.

Handlungssystem der Produktentwicklung: Handlungssysteme sind soziotechnische Systeme* und enthalten strukturierte Aktivitäten, Methoden und Prozesse sowie die an den Handlungen für die Zielerreichung beteiligten Ressourcen**. Das Handlungssystem erstellt das Zielsystem und das Objektsystem¹³⁷.

*Besteht ein System sowohl aus technischen als auch aus sozialen Elementen, wird es als soziotechnisches System bezeichnet.

¹³⁶ Koller 1978

¹³⁷ Albers / Meboldt 2007

****Als Ressourcen** werden im Allgemeinen die Mittel bezeichnet, die benötigt werden, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen.

Hilfsenergie: Die Energie, die als Grundenergie in einem System als Energiequelle eingesetzt wird.

Hochintegrierte Systeme: Ein System, das sowohl räumlich als auch funktional stark integriert ist und in dem alle Subsysteme über starke Wechselwirkungen zueinander verfügen, wird hier als hochintegriertes System bezeichnet.

Kinematische Kette: Eine kinematische Kette ist ein System aus starren Körpern, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Bei der Bewegung eines Körpers werden die daran angebrachten Körper mitbewegt.

Klasse: [lateinisch classis »Abteilung«]: Durch mindestens ein gemeinsames Merkmal verbundene Gruppe von Gegenständen (Individuen) werden als Elemente der Klasse bezeichnet¹³⁸.

Klassifikation: Die Gesamtheit aller Klassen bildet eine Klassifikation, auch Klassensystem oder Systematik genannt. Die Klassifikation ist das Endprodukt einer Klassifizierung¹³⁹.

Klassierung: Eine Klassierung ordnet Objekte in ein bereits bestehendes Klassensystem ein¹⁴⁰.

Komplexes System: Ein komplexes System wird hier nach Simon¹⁴¹ als ein System verstanden, das aus einer großen Zahl von Teilen zusammengesetzt ist, wobei diese Teile nicht bloß in einfachster Weise interagieren. In solchen Systemen ist das Ganze mehr als die Summe der Teile.

Komponente: Bei allen Teilsystemen oder Systemelementen handelt es sich um Komponenten¹⁴².

Konzeptionelle Verifikation: Mit einer konzeptionellen Verifikation ist eine Aussage darüber möglich, ob Konzepte von Systemelementen existieren, die zu dem System prinzipiell verträglich sind.

Kugelgelenk: Gelenk mit drei rotatorischen Freiheitsgraden, deren Drehachsen sich in einem Punkt schneiden.

Mechatronik: Mechatronik befasst sich mit technischen Systemen, die aus mechanischen, elektronischen/elektrischen und informationstechnischen Teilsystemen bestehen, welche durch intensive Wechselwirkungen gekennzeichnet sind und nicht mehr separat und disziplinentorientiert in unabhängigen Prozessen entwickelt werden können¹⁴³.

Mehrfachgelenk: In einem Mehrfachgelenk sind mehrere Einfachgelenke miteinander kombiniert. Hierbei handelt es sich um die reine mechanische Struktur dieser Gelenke (siehe Gelenkkomplex).

Methode: (von griechisch méthodos "Weg", "Gang einer Untersuchung") Methoden sind anwendungs- und ergebnisbezogene Anleitungen für Vorgehensweisen, die das planmäßige Verfahren zur Erreichung eines bestimmten Ziels beschreiben. Auch "Meta-Methoden", also Methoden, welche die Anwendung von anderen Methoden beinhalten, sind Methoden¹⁴⁴.

¹³⁸ Brockhaus 2005

¹³⁹ Albers / Burkardt 2007

¹⁴⁰ Albers / Brudniok 2007

¹⁴¹ Simon 1969 - S.145

¹⁴² Patzak 1982

¹⁴³ Albers 2002

¹⁴⁴ Albers / Brudniok 2007

Modul: (Entwicklungsbezogene Modularisierung) Die Wechselwirkungen zwischen den Modulen sind geringer ausgeprägt als die internen im Modul. Module sind unter Anpassung der Schnittstellen zur Umgebung konstruktiv gegen Module mit der gleichen Funktionalität austauschbar und können in der Entwicklung aufgrund ihrer räumlichen und funktionalen Integration als Ganzes betrachtet werden.

Nicht fluchtendes Gelenk: Gelenk, in dem die Drehachse senkrecht auf den Körperachsen der beiden Segmente der Tragstrukturen steht, die sich um einen Freiheitsgrad zueinander bewegen können.

Objektsystem: Das Objektsystem ist die realisierte Lösung des Zielsystems. Das Objektsystem ist dann vollständig, wenn der geplante Soll-Zustand dem Ist-Zustand entspricht.

Passives Gelenk: Gelenk oder beweglicher Bereich einer Mechanik, das nicht direkt angetrieben wird, sondern sich den Bewegung der umgebenden Tragstrukturen anpasst.

Primäre Energiequelle: Die Energie, die als Grundenergie in einem System als Energiequelle eingesetzt wird.

Räumliche Integration: Die Komponenten sind räumlich in einer gemeinsamen Gestalt miteinander gekoppelt.

Segment: Ein Segment ist eine starre Komponente der Tragstruktur, die zwei Gelenke miteinander verbindet.

Separater Gelenkantrieb: Antrieb, der separat ein Einzelgelenk antreibt (vgl. gekoppelter Gelenkantrieb).

Steller: Ein Wandler, der Hilfsenergie in eine Energieform umwandelt, die im System weitergenutzt wird und dem eine Stellgröße zugeführt wird.

System: Das System (griechisch systema - wörtlich das Gebilde, Zusammengestellte, Verbundene) hat verschiedene Bedeutungen, die jedoch alle die "Zusammenstellung" aus mehreren Elementen, die untereinander in Wechselwirkung stehen, gemeinsam haben¹⁴⁴.

In der Systemtheorie versteht man hierunter eine Menge von Elementen, die mit diskreten Attributen (Eigenschaften) ausgestattet sind, wobei die Elemente durch Relationen (Verknüpfungen, Beziehungen, Kommunikation) miteinander in einer organisierten Beziehung stehen¹⁴⁵.

Systemelement: Systemelemente sind die Objekte, aus denen die Funktionseinheiten zusammengesetzt sind. Bei ihnen handelt es sich um die kleinsten nicht sinnvoll weiter zu unterteilenden Systembestandteile. Sie müssen nicht physikalischer Natur sein, es kann sich beispielsweise auch um ein Softwareelement handeln.

Überbrücken eines Gelenks oder eines Freiheitsgrads: Übertragung der Antriebsleistung mit einem Systemelement des Antriebsstrangs von einem Körper zu einem anderen, die beide über ein Drehgelenk miteinander verbunden sind. Das Systemelement ist entweder unabhängig von der Bewegung des Drehgelenks oder wird von dieser beeinflusst.

Übergeordneter Gelenkkomplex: Gelenkkomplex, das durch seine Bewegungen alle in der seriellen Kinematik untergeordneten Gelenkkomplexe mitbewegt.

Untergeordneter Gelenkkomplex: Gelenkkomplex, das von allen in der seriellen Kinematik übergeordneten Gelenkkomplexen mitbewegt wird.

¹⁴⁵ Koreimann 1972

Technisches Gelenk: Repräsentation eines Gelenks in einer technischen Lösung, in der mindestens zwei Tragstrukturen gelenkig zueinander beweglich sind.

Teilsystem: Teil des Gesamtsystems.

Vorgehensmodell: In einem Vorgehensmodell wird ein Prozess in Phasen unterteilt, die schrittweise zu bearbeiten sind. Für die Bearbeitung der Phasen werden Methoden oder Vorgehensweisen bereitgestellt.

Wandler: Dies ist eine Komponente, die eine Energieform und/oder ein Signal, das am Eingang anliegt, in eine Energieform und/oder ein Signal wandelt, das am Ausgang herausgeht. Ein Beispiel aus der Mechanik ist ein Wandler im Antriebsstrang (z.B. Drehmomentenwandler) oder ein Wandler in der Elektronik, der ein analoges Signal in ein digitales Signal wandelt, oder ein digitales Signal in ein analoges wandelt, oder ein analoges oder digitales Signal verändert (A/D, D/A, A/A, D/D-Wandler).

Wirkflächenpaar: Wirkflächen sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise in Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind. Wirkflächenpaare werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird¹⁴⁶.

Zielsystem: Das Zielsystem beschreibt alle relevanten Ziele und deren Abhängigkeiten und Randbedingungen, die für die Entwicklung der richtigen Lösung nötig sind, nicht jedoch die Lösung selbst. Im Laufe des Produktentstehungsprozesses wird das Zielsystem permanent erweitert (verändert) und konkretisiert.

¹⁴⁶ Mathiesen 2002