

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

**1. A. Albers / 2. C. Sauter / 3. S. Brudniok**

## **Entwicklung Humanoider Roboterkomponenten**

### **ABSTRACT**

Ziel der Entwicklung Humanoider Roboter ist es, den Menschen in seinem äußeren Erscheinungsbild und seinen vielfältigen Fähigkeiten in einem technischen System nachzubilden. Ein Roboter, der ähnliche mechanische Fähigkeiten aufweist wie der Mensch, kann in dessen Umgebung als Serviceroboter für eine Vielzahl verschiedener Aufgaben eingesetzt werden. Selbstständig oder in Kooperation mit dem Menschen kann er unterstützende Tätigkeiten, wie zum Beispiel das Beladen einer Geschirrspülmaschine, verrichten. In Karlsruhe arbeiten Wissenschaftler aus mehreren Forschungseinrichtungen und verschiedenen Fakultäten der Universität Karlsruhe (TH) gemeinsam im Sonderforschungsbereich (SFB) 588 „Humanoide Roboter - lernende und kooperierende multimodale Humanoide Roboter“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft an diesem Themengebiet. Am Institut für Produktentwicklung IPEK werden die mechatronischen Komponenten für das Demonstratorsystem, den Humanoiden Roboter, des Sonderforschungsbereiches entwickelt und aufgebaut.

Ein Humanoider Roboter stellt ein Beispiel für ein hochkomplexes mechatronisches System dar, an dem die Fachgebiete Maschinenbau, Elektrotechnik, Regelungstechnik und Softwaretechnik beteiligt sind. Um eine zielsystemgerechte Funktion des Gesamtsystems sicherzustellen, müssen bei der Entwicklung solcher Roboter die Anforderungen aus allen beteiligten Fachrichtungen berücksichtigt werden. Ohne eine strukturierte methodische Vorgehensweise führt dies häufig zu langwierigen iterativen Entwicklungsprozessen [1]. Die Gründe hierfür sind in den starken Interaktionen zwischen den Einzelkomponenten des Gesamtsystems zu finden. Diese führen oft zu widersprüchlichen, oft auch von den beteiligten Fachbereichen unterschiedlich formulierten und beurteilten Zielvorgaben sowie zu fachspezifischen und sich gegenseitig beeinflussenden Handlungssystemen für das Objektsystem Humanoider Roboter. Eine allgemeine Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte wird in der VDI 2206 [2] beschrieben. Diese ist aber aufgrund ihres hohen Abstraktionsgrades für Entwickler Humanoider Roboter nicht direkt anwendbar und bietet kaum konkrete Handlungsanweisungen für domänenspezifische Entwicklungsschritte. Für die effektive und zeiteffiziente Entwicklung multitechnologischer

Systeme muss das Zielsystem umfassend geklärt, erfasst und so dargestellt werden, dass es für die beteiligten Entwickler aus ihrer jeweiligen, domänenspezifisch geprägten Sichtweise heraus verständlich ist. Gleichzeitig sollte es dem Entwickler während aller Phasen der Entwicklung möglich sein, die für multitechnologische Entwicklungsprozesse typischen, rückwirkungsbehafteten Wechselwirkungen zu erkennen, um die Auswirkungen der eigenen Entscheidungen und Handlungen auf das Gesamtsystem bewerten zu können. Für Lösungen dieser entwicklungsmethodischen Problemstellungen werden derzeit am IPEK Forschungsarbeiten auf Basis der Feature-Technologie [3] sowie der Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix [4] durchgeführt.

### **ANFORDERUNGEN AN DIE MECHANISCHE GRUNDSTRUKTUR EINES HUMANOIDEN ROBOTER**

Die Humanoide Robotik ist ein junges Forschungsgebiet und noch weit davon entfernt, die Intelligenz des Menschen und die motorischen Fähigkeiten des menschlichen Körpers in ein technisches System umsetzen zu können. Die Entwicklung eines Humanoiden Roboters stellt daher eine besondere Herausforderung an die Entwickler aus den beteiligten Fachgebieten dar [5]. Aus der Zielsetzung, dass Humanoide Roboter den Menschen als universelle Helfer, alleine oder in Kooperation mit dem Benutzer, bei einer Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben unterstützen sollen, ergeben sich umfangreiche Anforderungen an die zu entwickelnden Teilsysteme. Die mechanische Grundstruktur eines Humanoiden Roboters muss vielseitig und leistungsfähig aufgebaut sein, um die Aufgaben aus den Bereichen Manipulation und Gestik erfüllen zu können. Da es mit dem heutigen Stand der Technik nicht möglich ist, die Fähigkeiten des Menschen technisch gleichwertig abzubilden, ist es notwendig, die Kinematik, Aktorik und Sensorik des Roboters so zu beschränken, dass die im Zielsystem definierten Tätigkeiten verrichtet werden können. Im Teilprojekt M3 „Analyse und Modellierung menschlicher Basisbewegungen“ des SFB 588 werden Bewegungen des Menschen erfasst und daraus Bewegungsmodelle abgeleitet [6]. Diese werden anschließend auf die, im Vergleich zum Menschen deutlich reduzierte, Kinematik des Roboterkonzeptes übertragen. Daraus ergeben sich die Anforderungen an die Bewegungsmöglichkeiten und die erforderliche Dynamik in den einzelnen Gelenken. Die Hände und die Arme sind die wichtigsten Werkzeuge des Menschen für die Manipulation von Gegenständen. Aus diesem Grund wird im SFB 588 großen Wert auf eine hohe Funktionalität dieser Teilsysteme gelegt. Hiermit unterscheidet sich der Karlsruher Roboter von vielen seiner asiatischen Kollegen. Einige von ihnen haben ein hohes Entwicklungsstadium erreicht [7] und können z.B. auf zwei Beinen laufen. Die Arme dieser Roboter

können oft nur gestikulative Aufgaben erfüllen. Hierfür sind einfache und leichte Arme mit geringer Tragfähigkeit ausreichend. Der Karlsruher Humanoide Roboter ist darauf ausgelegt, Handlungen auszuführen, für die ein leistungsfähiger mechatronischer Oberkörper notwendig ist.

Die Arme verfügen über jeweils sieben Freiheitsgrade. An jedem Gelenk werden die Winkelposition, die Winkelgeschwindigkeit und das anliegende Moment gemessen. Bei der nächsten Generation der Schulter wird die Beweglichkeit durch einen zusätzlichen Schultergürtel um jeweils zwei Freiheitsgrade erweitert werden. Um eine hohe Dynamik der Armbewegungen zu ermöglichen, wird bei der Entwicklung Wert auf Leichtbau gelegt. Die Anforderungen hinsichtlich der Positioniergenauigkeit, der Dynamik und der zu bewegenden Nutzlast von 1 kg sind im Vergleich zu den Anforderungen an typische Industrieroboter gering, stellen jedoch bei Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Bauraums und der Leichtbauvorgabe, eine Herausforderung für den Konstrukteur dar. Ein wesentliches Merkmal des Karlsruher Roboters besteht in der Kooperation mit dem Menschen. Die Sicherheit des Benutzers hat dabei höchste Priorität. Hieraus ergeben sich spezielle Anforderungen auch an die Mechanik. Primär soll mit Hilfe der Regelungstechnologie Kollisionen mit dem Benutzer vermieden werden. Die im Arm eingebauten Kraftsensoren können bei einem Versagen dieser präventiven Sicherheitsmaßnahmen zusätzlich zur Kraftregelung auch zur Erkennung von Kollisionen dienen. Zusätzlich werden die Segmente des Oberkörpers mit einer taktilen Hautsensorik ausgestattet, die sowohl zur Kollisionsdetektion als auch zur taktilen Kommunikation mit dem Roboter eingesetzt werden kann. Im Falle eines plötzlichen Energieausfalles darf der Roboter keine unkontrollierten Bewegungen ausführen. Sämtliche Komponenten verbleiben in ihrer aktuellen Position oder gleiten langsam in eine stabile Lage.

## **ENTWICKLUNGSSTAND HUMANOIDER ROBOTERKOMPONENTEN AM IPEK**

Die Abmessungen des Demonstrators des SFB 588 entsprechen denen einer durchschnittlichen europäischen Frau mit einer Körpergröße von 1,65m. Die Entwicklung der mechanischen Teilsysteme des Oberkörpers, ohne die Hände, wird am IPEK durchgeführt. Der Oberkörper ist unterteilt in die Teilsysteme Arme, Hals, Kopf mit Pan-Tilt-Einheiten sowie Torso. Der Oberkörper wird auf einer holonomen Lokomotionsplattform bewegt.

Der Roboterarm besitzt insgesamt sieben Freiheitsgrade, drei davon in der Schulter und jeweils zwei im Handgelenk und im Ellenbogen. Alle Freiheitsgrade werden mit Servomotoren und ein- oder zweistufigen mechanischen Momentenwandlern angetrieben. Die Winkelmessung in Schulter und Ellenbogen wird mit hochauflösenden, quasi-inkrementalen Winkelsensoren durchgeführt. Diese

optischen Winkelsensoren besitzen eine feinauflösende Inkrementalspur sowie eine weitere Codespur die es ermöglicht, die absolute Winkelposition nach einem geringen Verfahrweg zu bestimmen. Aufgrund des geringen Bauraums und der bei diesen Freiheitsgraden geringeren Anforderungen an die Auflösung, werden im Handgelenk kleine, potentiometrische Winkelsensoren eingesetzt. Zusätzlich verfügen alle Motoren über optische Impulsgeber zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit. Die Kraftmessung für die Schulter und den Ellenbogen ist in die Antriebsstränge integriert. In der Schulter erfolgt die Messung über eigens entwickelte DMS-Miniatur-Drehmomentmesswellen, die direkt am jeweiligen Gelenk angebracht sind. Das Ellenbogengelenk wird über Seilzüge mit integrierten Miniatur-Kraftsensoren angetrieben. Die Antriebsmotoren und die Übersetzung sind in den Torso ausgelagert, um eine Gewichtseinsparung bei den bewegten Teilen des Armes zu erreichen. Die Kraftmessung für das Handgelenk wird über eine kleine Kraftmessdose der Firma ATI zwischen Handgelenk und Hand realisiert.

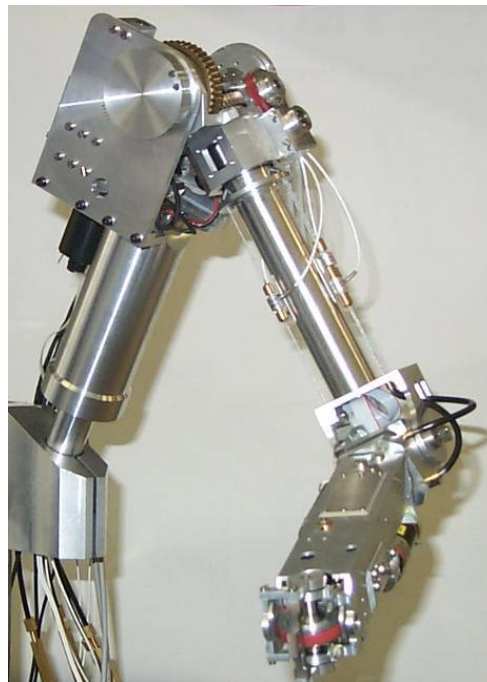


Abbildung1: Roboterarm mit sieben Freiheitsgraden

Die Halseinheit des Karlsruher Humanoiden Roboters besitzt vier Freiheitsgrade. Die Drehachsen von drei Freiheitsgraden schneiden sich in einem Punkt im unteren Bereich des Halses. Ergänzend kommt ein vierter Freiheitsgrad hinzu, der ein Nicken des Kopfes um eine Achse im unteren Bereich des Kopfes ermöglicht. Der Antrieb des Halses erfolgt spielfrei mit einer Kombination aus Zahnriemenstufen und Harmonic Drive Getrieben. Da die Bewegungen des Kopfes nicht kraftgeregelt durchgeführt werden, kann auf eine Kraftmessung im Hals verzichtet werden. Die folgende Abbildung zeigt die aktuelle Version des Halsgelenkes.



Abbildung 2: Halsgelenk mit vier Freiheitsgraden

Zur Bilderfassung ist ein im Roboterkopf montiertes Stereo-Kamerasystem vorgesehen. Die Kameras können durch zwei Bewegungseinheiten, so genannte Pan-Tilt-Units, unabhängig voneinander um jeweils zwei Freiheitsgrade geschwenkt werden. Der geforderte Verstellbereich beträgt  $\pm 60^\circ$  horizontal und  $\pm 30^\circ$  vertikal. Um mit Hilfe der Kameras per Triangulation Entfernungsmessungen durchführen zu können, beträgt die Positioniergenauigkeit  $0,1^\circ$ . Die Kameras können in weniger als 0,1 Sekunden auf ein neues Objekt ausgerichtet werden. Dies entspricht in etwa den menschlichen Augenbewegungen. Der Bauraum ist durch die Größe des menschlichen Kopfes stark eingeschränkt, da im Roboterkopf neben den Kameras Komponenten wie Rechner und weitere Sensoren untergebracht werden sollen. Der Antrieb ist so gestaltet, dass die beiden Antriebsmotoren nicht mit der Kamera mitbewegt werden. Durch diese Maßnahme kann eine hohe Dynamik in diesem System erzielt werden. Als Antriebe dienen hochdynamische Gleichstrommotoren. Die inkrementalen Winkelsensoren besitzen eine Auflösung von 1000 Inkrementen pro Umdrehung. Verbunden mit einer Vierfachauswertung wird damit die geforderte Auflösung von  $<0,1^\circ$  erreicht.

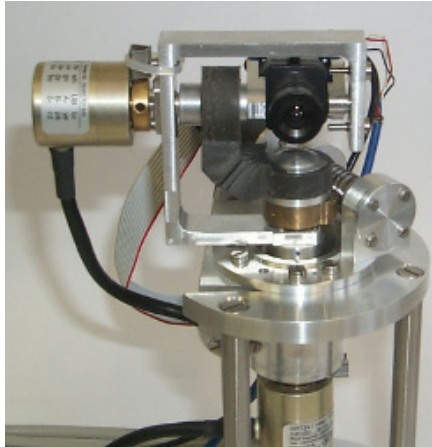


Abbildung 3: Kamerabewegungseinheit mit zwei Freiheitsgraden

Der Robotertorso ist unterteilt in ein Torsogelenk im Bereich des Unterkörpers und einen starren Thorax, der die Arme und den Hals sowie einen Großteil der Elektronik- und Informationsverarbeitungskomponenten aufnimmt. Das Torsogelenk ermöglicht die Bewegung des restlichen Oberkörpers relativ zur fahrbaren Plattform in drei Drehachsen. Die Anforderungen an die Dynamik sind hier deutlich geringer, gleichzeitig müssen aber bei relativ großem Bewegungsraum höhere Lasten bewegt werden. Sämtliche Kabel die den Oberkörper des Roboters mit der Plattform verbinden werden zentral durch den Schnittpunkt aller drei Drehachsen und entlang der Hochachse geführt, um die Belastungen für die Kabel so gering wie möglich zu halten.

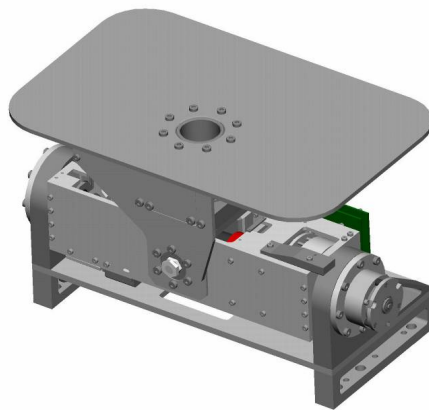


Abbildung 4: Torsogelenk mit drei Freiheitsgraden

Der Thorax des Roboters besteht aus einer zentralen Tragstruktur zur Befestigung von Armen und Hals sowie zur Aufnahme der Rechner- und Elektronikkomponenten. Um diese Tragstruktur bei geringem Gewicht möglichst steif zu gestalten, wird mit Hilfe numerischer Methoden eine Topologieoptimierung durchgeführt. Eine starre, mehrteilige Hülle dient zur Anbringung einer taktilen Hautsensorik am Thorax sowie am Arm. Die folgende Abbildung zeigt einen Entwurf für den Oberkörper mit am IPEK entwickelten Roboterkomponenten mit unverkleideten Armen in Vorder- und Rückansicht.



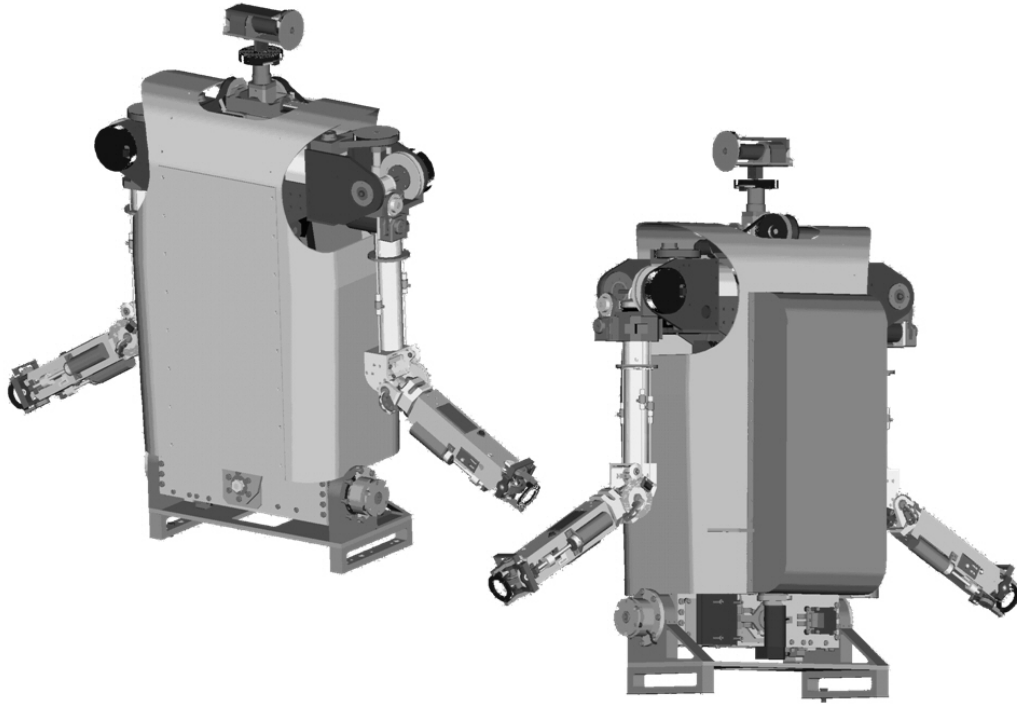


Abbildung 5: Entwurf des Roboteroberkörpers

### DANKSAGUNG

Diese Arbeit wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 588 - „Humanoide Roboter - Lernende und kooperierende multimodale Roboter“.

#### Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Frank, H.: Skalierbares modulares Antriebssystem zur Optimierung linearer Bewegungsabläufe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [2] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, VDI-Verlag, 2004.
- [3] VDI-Richtlinie 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie, VDI-Verlag, 2004.
- [4] Puls, C.: Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zum Management von Konfigurationswissen in KMU, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 153, VDI Verlag, 2003
- [5] Albers, A.; Brudniok, S.; Burger, W.: Der humanoide Roboter als Herausforderung für den Konstrukteur. Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieure - Werkstoffe, Hrsg.: Birkhofer, Feldhusen, Lindemann, Springer VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004, ISSN 0720-5953, S. 62 – 63, 2004.
- [6] Beth, T.; Boesnach, I.; Haimerl, M.; Moldenhauer, J.; Bös, K.; Wank, V.: Analyse, Modellierung und Erkennung menschlicher Bewegungen, 1. SFB-Aussprachetag, Human Centered Robotic Systems, HCRS 2002, 5.-6. Dezember, Karlsruhe, Germany
- [7] Brudniok, S.: Recherche des weltweiten Entwicklungsstandes humanoider Roboter. Diplomarbeit Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe 2002.

#### Autorenangabe(n):

o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers

Dipl.-Ing. Christian Sauter

Dipl.-Ing. Sven Brudniok

Institut für Produktentwicklung Karlsruhe IPEK, Universität Karlsruhe (TU), Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608 7410

Fax: +49 721 608 6051

E-mail: [sauter@ipek.uni-karlsruhe.de](mailto:sauter@ipek.uni-karlsruhe.de)