

**Universität Karlsruhe (TH)**  
**Institut für Industrielle Bauproduktion (ifib)**

Dr. ès. sc. tech. Niklaus Kohler

An die  
Deutsche Forschungsgemeinschaft  
Kennedyallee 40  
53175 Bonn

**Antrag**

auf Förderung eines Forschungsvorhabens im Einzelverfahren

**1. Allgemeine Angaben**

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe (Neuantrag)

**1.1 Antragsteller**

*Dr. ès. sc. tech. Niklaus Kohler*

ordentlicher Professor und Institutsleiter,  
geb. 14.10.1941, Schweizer

Dienstadresse: Universität Karlsruhe (TH)  
Fakultät für Architektur  
Institut für industrielle Bauproduktion (ifib)  
76128 Karlsruhe

Telefon (0721) 608 2166  
Telefax (0721) 661115  
email niklaus@ifib.uni-karlsruhe.de

Privatadresse: Gluckstr. 18  
76185 Karlsruhe

Telefon (0721) 554625

*Dr.-Ing. Heinz Wörn*

ordentlicher Professor und Institutsleiter,  
geb. , Deutscher

Dienstadresse: Universität Karlsruhe (TH)  
Fakultät für Informatik  
Institut für Prozeßrechentechik und Robotik (IPR)  
76128 Karlsruhe

Telefon (0721) 608  
Telefax (0721) 608  
email woern@ira.uka.de

Privatadresse:

7

Telefon ()

## **1.2 Thema**

“Interaktion zwischen Mensch, Raum und Roboter”

## **1.3 Kennwort**

“Mensch-Raum-Roboter”

## **1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung**

Architektur: Computer Aided Architectural Design (CAAD), Computer Aided Engineering (CAE)

Informatik: Verteilte Systeme, Robotik

## **1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer:**

Beginn der Laufzeit: 01.10.1998

Förderungsbeginn: 01.10.1998

voraussichtl. Gesamtdauer: 3 Jahre

voraussichtl. Förderungsdauer: 3 Jahre

## **1.6 Antragszeitraum:**

3 Jahre: 01.10.1998 - 30.09.2001

## **1.7 Gewünschter Beginn der Förderung**

01.10.1998

## **1.8 Zusammenfassung**

## **2. Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten**

### **2.1 Stand der Forschung**

Roboter:

- strukturierte Umgebung (Führungsschienen) oder Einsatz von Sensorik.
- autonom ... semi-autonom (interaktiv) ... slave (online)

Bsp. Flight-Manager: Roboter macht parallel Arbeit des Piloten (Situationsbewertung) und gibt ggf. Hinweise

Roboter im Bauwesen: Bisher Rohbau, aber auch Mauerroboter sind nur eingeschränkt einsetzbar

Roboter-Programmierung (implizite Programmierung)

Interaktion Roboter - Mensch: Erst seit 2 Jahren. Derzeit: gemeinsames Tragen (Compliant

Motion)

Gegenwärtig werden große Anstrengungen unternommen, um Roboter in nicht-industriellen Bereichen der Automatisierung einzusetzen. In [Schraft 1996] werden Anwendungen von Robotern in Service-Bereichen beschrieben. Beispiele hierfür sind Anwendungen von Robotern in der Chirurgie [Ho *et al.* 1993, Burghart *et al.* 1998, Raczkowski *et al.* 1998], in der Rehabilitation [Kawamura & Iskarous 1994] und auf der Baustelle [Pritschow *et al.* 1995, Spath *et al.* 1994].

In diesen neuen Anwendungsbereichen der Robotik wird nicht versucht, den Menschen durch einen Roboter zu ersetzen, sondern vielmehr soll der Roboter dem Menschen assistieren und seine höhere Präzision und Genauigkeit gegenüber den Menschen genutzt werden. Mensch und Roboter arbeiten gemeinsam an der Bearbeitung einer Aufgabe. Dies definiert an die Robotersteuerung neue Anforderungen:

- Der Roboter muß fähig sein, mit dem Menschen direkt, z.B. mittels Kontaktkräften, zu interagieren.
- Der Roboter muß über eine gewisse Intelligenz verfügen, die es ihm ermöglicht, die Absicht des Menschen durch implizite Kommunikation zu erkennen.

Die Interaktion von Mensch und Roboter ist ein bislang wenig untersuchtes Gebiet. Der Stand der Technik gliedert sich in zwei Bereiche:

- Flexible Robotersteuerung
- Implizite Kommunikation

### **(1) Flexible Robotersteuerung**

Es wurden in der Forschung bereits verschiedene Ansätze untersucht, welche die direkte Arm-Roboter-Interaktion ermöglichen. Unter Arm-Roboter Interaktion versteht man die intelligente Zusammenarbeit von Roboter und Mensch. Die bisherigen Arbeiten können in drei Klassen aufgeteilt werden: Die passiven Manipulatoren, die Verstärker und die reaktiven Roboter.

*Passive Manipulatoren.* Passive Manipulatoren sind handgesteuerte Bewegungsapparate. Der Benutzer positioniert den Manipulator, und der Manipulator behält die angenommene Konfiguration bei. Ein Beispiel für einen Manipulator, der chirurgische Werkzeuge in bestimmten Konfigurationen halten kann, wird in [Faraz & Payandeh 1997] beschrieben.

*Roboter als Verstärker.* "Verstärker" kennzeichnet die Klasse von Robotern, die die Kräfte des Menschen vervielfachen. Die Steuerung des Roboters basiert auf einer Master-Slave Architektur. Der Roboter macht nach, was der Mensch vormacht. In [Deeter *et al.* 1997] wird untersucht, wie Mensch und Roboter gemeinsam Munition auf Flughäfen transportieren und an einem Flugzeug fixieren. Der Flughafen stellt eine sehr dynamische und unstrukturierte Umgebung dar, die für die Vollautomatisierung nicht geeignet ist. Die Entwicklung von intelligenten autonomen Maschinen ist in solchen Umgebungen sehr komplex, und Realisierungsmöglichkeiten sind noch nicht absehbar. In diesen dynamischen und unstrukturierten Umgebungen eignet sich die Mensch-Roboter Kooperation besonders, da die Fähigkeiten des Menschen (vor allem Wissen) mit den Fähigkeiten von Robotern kombiniert werden können, wie z.B. exakte Positionierung, hohe Traglast, keine Ermüdung. Hierbei werden die Fähigkeiten des Menschen und des Roboters geeignet kombiniert, um die Aufgabenanforderungen am besten erfüllen zu können. In [Kazerooni 1996] ist ein Überblick über die sogenannten "Verstärker" (extenders) gegeben, die an der California Universität Berkeley entwickelt wurden. Andere Varianten des der "Verstärker" findet man in [Kazuhiro *et al.* 1993].

*Reaktive Roboter.* Diese Klasse umfaßt Roboter, die auf eine Aktion des Menschen autonom reagieren können. Ohne Eingriff des Menschen bleiben sie inaktiv. Diese Roboter leisten entweder einen gewünschten Widerstand gegen den Druck des Menschen oder lenken die Kraft des Menschen um. Durch dieses Verhalten wird die Sicherheit des Menschen in allen Situationen gewährleistet. In [Ho *et al.* 1995] wird der Einsatz eines solchen Roboters für die Knieoperation untersucht. Der Roboter hält die Säge und wird durch eine kraftgekoppelte Steuerung vom Chirurgen bewegt. Der Chirurg übt eine Kraft auf den Roboter aus. Diese Kraft (mit den

Komponenten Richtung und Betrag) wird in dem aktuellen Kontext (Position der Säge) interpretiert und der Roboter reagiert entsprechend (durch Widerstand, Steifigkeit oder Umleitung der Kraft des Chirurgen). Wenn der Chirurg keine Kraft auf den Roboter ausübt, bleibt der Roboter passiv. Die Rolle des Roboters ist hier nur auf die Umleitung der Kraft des Chirurgen begrenzt. Durch diese flexible Robotersteuerung werden die komplementären Eigenschaften des Chirurgen (Erfahrung, Wissen) und des Roboters (Genauigkeit, Wiederholgenauigkeit) kombiniert. In [Jarrah & Zheng 1997] wird eine kraftgekoppelte Robotersteuerung für das gemeinsame Tragen von schweren Objekten vorgestellt. Als Anwendungsbeispiel für die Arm-Roboter-Kooperation in einer unstrukturierten Umgebung wird in diesem Artikel die Installation eines Fensters auf der Baustelle beschrieben. Das System ist einerseits nicht intelligent genug, um das Fenster selbständig zu installieren, wegen der Dimensionen und des Gewichtes des Fensters kann aber ein Arbeiter andererseits das Fenster nicht alleine halten. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher bei der Untersuchung der geschlossenen kinematischen Kette, die von dem menschlichen Arm, dem getragenen Objekt (Fenster) und dem Roboter gebildet wird.

Zusammenfassend betrachten die hier erwähnten Arbeiten eine flexible kraftgekoppelte Steuerung, die die Arm-Roboter-Kooperation ermöglicht. Diese Ansätze sind aber auf die Regelungsebene begrenzt (low-level). Hierbei wird die Absicht des Menschen nicht interpretiert, und der Roboter kann sich an verschiedene Kontexte nicht selbständig anpassen (high-level).

## **(2) Implizite Kommunikation**

Die implizite Kommunikation zwischen Mensch und Roboter erfolgt durch die Erkennung der Absicht des Menschen. Diese Absichtserkennung ist eine typische Problemstellung des maschinellen Lernens. Die für das Lernen entwickelten Mustererkennungsalgorithmen können zwar für die Erkennung der Absicht des Menschen in dem Mensch-Roboter-Team angepaßt werden, sie sind jedoch nicht direkt übernehmbar. In diesen Ansätzen wird teilweise der Versuch unternommen, den Bewegungsablauf in einzelne, klar voneinander zu unterscheidende Bewegungsphasen zu segmentieren [Buss 1995]. Die Arbeiten auf dem Gebiet des maschinellen Lernens betrachten den Transfer menschlicher Fähigkeiten (meist bei der Montage) auf ein Robotersystem und zielen letztlich auf einen unabhängigen Einsatz des Roboters ab.

Bei der Mensch-Roboter Kooperation wird die Ausführung der Aufgabe zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt. Daher ist ein einfaches Nachmachen des Menschen durch den Roboter, wie es z.B. beim maschinellen Lernen der Fall ist, nicht ausreichend. Die implizite Kommunikation für die Mensch-Roboter Kooperation wurde ansonsten bisher wenig untersucht. Einige interessante Ansätze sind in den folgenden Veröffentlichungen zusammengefaßt:

In [Sato *et al.* 1994] wird das aktive Verstehen der menschlichen Absicht untersucht. Bisher wurden Roboter immer durch Eingabegeräte wie z.B. Tastatur oder Maus gesteuert. Um den Roboter steuern zu können, muß der Mensch vorher seine Absicht in eine vom Roboter explizit verständliche Sprache übersetzen. Dies stellt eine zusätzliche Anforderung für den Menschen dar. Deshalb wird in dieser Arbeit die implizite Kommunikation untersucht. Als Beispielumgebung für die implizite Kommunikation wird ein Mikroroboter verwendet, der sich durch das Erkennen der Haltung des Menschen in verschiedene Betriebsmoden (grobe und feine Bewegung des Roboters) umschalten läßt.

In [Lamine *et al.* 1997] wurden verschiedene *Kontaktmuster* zwischen dem menschlichen Arm und einem Roboter untersucht. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt bei der Untersuchung verschiedener Kontrollparameter des Roboters und des daraus folgenden Gefühlseindrucks beim Benutzer (ruhig, beruhigend, unangenehm).

In [Mizuguchi *et al.* 1997] wurde ein Roboter entwickelt, der durch Gesten, Aktionen und Bewegungen mit dem Menschen kommuniziert. Der Roboter hat sieben Freiheitsgrade und kann durch das Zusammenspiel von 14 verschiedenen Parametern (Winkel und Winkelgeschwindigkeit für jeden Freiheitsgrad) ohne Spracheingabe und Sprachausgabe mit dem Menschen kommunizieren.

Die oben erwähnten Veröffentlichungen zeigen neue Anwendungen der impliziten Kommunikation auf der physikalischen Ebene. Die bisher untersuchten Ansätze bleiben jedoch sehr begrenzt.

Insbesondere der Inhalt des Informationsaustausches ist meistens sehr gering, und es besteht noch keine Dialogmöglichkeit zwischen Mensch und Roboter. Die Rückkopplung in die Steuerung des Roboters wird daher oftmals nicht betrachtet.

Zusammenfassend wurde die Kooperation von Mensch und Roboter bislang nicht umfassend untersucht. Die meisten Ansätze betrachten nur Teilaspekte der Mensch-Roboter-Kooperation. Entweder wird nur eine flexible Robotersteuerung untersucht, die es dem Roboter erlaubt, nachgiebig zu reagieren, ohne daß der Roboter über das notwendige Wissen zur Interpretation der Interaktion mit dem Menschen und der Umgebung verfügt, oder aber es wird nur die Interpretation der Absicht des Menschen betrachtet ohne direkte Rückkopplung in die Robotersteuerung (Dialogmöglichkeit). Das wichtige Problem der optimalen Funktionsverteilung zwischen Mensch und Roboter bei der Aufgabenbearbeitung wird vernachlässigt oder nur statisch betrachtet. Die Sicherheit des Menschen wird lediglich durch die Passivität des Roboters gewährleistet.

## 2.2 Eigene Vorarbeiten

Simulation Bauprozesse

Wissensbasierte Bewegungsausführung, implizite Programmierung, Methoden der KI

Skizze aus [Rembold 94]

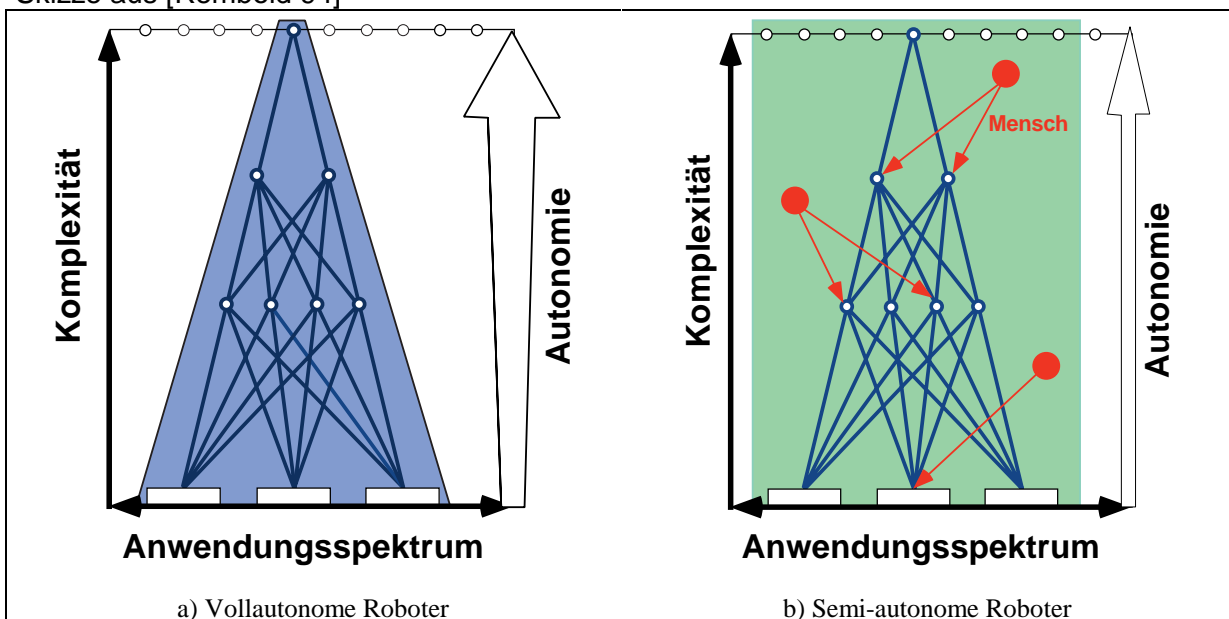


Abbildung 1: Domain restriction problem

Die Kooperation zwischen zwei Robotern wurde am Institut für Prozeßrechentchnik, Automation und Robotik im Rahmen des SFB 314 eingehend untersucht. Es wurden Methoden entwickelt, durch die die Bewegung eines Zweiarmsrobotersystems in einer geschlossenen kinematischen Kette ermöglicht wurde [Damm 1995]. Damit können auch schwere oder große Objekte gehandhabt werden. Die dabei entwickelten Algorithmen lassen sich nicht unmittelbar auf die Mensch-Roboter-Kooperation umsetzen; die Erkenntnisse über das Zusammenspiel kraftgekoppelter Systeme können jedoch nutzbringend eingesetzt werden.

Die Entwicklung von Strategien zur sensorgestützten automatischen Montage von Bauteilen war Gegenstand der Dissertation von [Schloen 1994]. Die dort entwickelten Verfahren ermöglichen die sensorgestützte Montage für Ein- und Mehrrobotersysteme. Da im Rahmen des hier beantragten Vorhabens auch die kooperierende Mensch-Roboter-Montage betrachtet wird, sollen die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse die Basis für die neue Entwicklung bilden.

Die Interaktion intelligenter Robotersysteme wurde im Rahmen von Multi-Agenten-Systemen betrachtet. Hierbei wurden bereits grundlegende Untersuchungen über die Kommunikations- und Interaktionsformen zwischen intelligenten Systemen durchgeführt [Längle 1996]. Gegenstand der Untersuchung sind inhomogene Robotersysteme, die bei der Ausführung von Aufgabenstellungen eine unterschiedliche Eignung haben und zusammenwirken müssen. Die bisher gewonnenen Ergebnisse stellen eine gute Grundlage für die Ausdehnung der Betrachtungen auf "menschliche Agenten" dar.

Die Einschränkung des Arbeitsraumes eines stationären Robotersystems reduziert die Möglichkeit der Interaktion des Menschen mit dem Roboter. Ein gemeinsamer Transport eines Objektes ist beispielsweise nur über kurze Strecken möglich. Die gemeinsame Handhabung von Objekten reduziert sich auf den Arbeitsraum des Robotersystems. Diese Einschränkung kann durch die Mobilität des Robotersystems und eine geeignete Steuerung aufgehoben werden. Im Rahmen des SFB 314 wurde eine reaktive Steuerung entwickelt, die den Arbeitsraum eines Robotersystems mit einem oder mehreren Robotern durch Ausnutzung der Mobilität des Robotersystems erweitert [Nassal 1996]. Dabei können auch Kollisionen der mobilen Plattform und der Roboter verhindert werden.

Die Erkennung der Absicht des Menschen wurde im Rahmen von Arbeiten im Bereich des maschinellen Lernens untersucht. Hierbei wurden bereits grundlegende Ergebnisse über die Erkennung von Bewegungsabläufen und Segmentierung von Bewegungsphasen erzielt. Die in [Kaiser 1996] entwickelten Erkennungsalgorithmen für die Mensch-Roboter Interaktion können an die Mensch-Roboter-Kooperation angepaßt werden.

In [Schmitt 1997] wurde die Problematik der Verfolgung von Objekten untersucht, die sich durch den Bildbereich der Kamera eines Real-Time Tracking Systems (RTT) bewegen. Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden zum Einfangen und Verfolgen von bewegten Objekten können zur Überwachung der Mensch-Roboter-Interaktion verwendet werden, um beispielsweise die Sicherheit des Menschen gewährleisten zu können.

Insgesamt wurden am Institut bereits umfangreiche Forschungsarbeiten im Bereich der autonomen und teilautonomen Systeme durchgeführt, so daß eine gründliche experimentelle Evaluierung der Ansätze erwartet werden kann. Im Umfeld des autonomen Robotersystems KAMRO wurden viele grundlegende Forschungsergebnisse erzielt, die in das beantragte Forschungsvorhaben einfließen [Lüth et al. 1995].

#### **Literatur:**

Burghart *et al.* 1998

Burghart, C.; Münchenberg, J.; Rembold, U. (1998): *A System for Robot Assisted Maxillofacial Surgery*. In Proc. of Medicine Meets Virtual Reality (MMVR'98), San Diego, January 1998.

Buss & Hashimoto 1995

Buss, M.; Hashimoto, H. (1995): *Hand manipulation skill learning for the intelligent cooperative manipulation system ICMS*. Tagungsband: *Intelligent Autonomous Systems 4*, Seiten 279 - 286, Karlsruhe, 1995.

Damm 1995

Damm, M. (1995): *Zweiarm-Koordination kraft geregelter Manipulatoren mit situationsabhängiger Lastverteilung*, Dissertation. Universität Karlsruhe, Institut für Prozeßrechen-technik und Robotik, 1995.

Deeter *et al.* 1997

Deeter, T. E.; Koury, G. J.; Rabideau, K. M.; Leahy, M. B. (1997): *The next generation munitions handler advanced technology demonstrator program*. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, April 1997.

Faraz & Payandeh 1997

Faraz, A.; Payandeh, A. (1997): *A Robotic Case Study: Optimal Design for Laparoscopic Positioning Stands*. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1553-1560, Albuquerque, New Mexico, April 1997.

- Ho et al. 1995  
 Ho, S. C.; Hibberd, R. D.; Davies, B. L. (1995): *Robot Assisted Knee Surgery*. IEEE Engineering in Medicine and Biology, (1995). Reprinted in Groen, F.C.A.; Hirose, S.; Thorpe, C.E. (Ed.), Proceedings of the International Conference IAS-3, IOS Press, Washington, pp. 449-458, 1995
- Jarrah & Zheng 1997  
 Al-Jarrah, O. M.; Zheng, Y. F. (1997): *Arm - Manipulator Coordination for Load Sharing Using Variable Compliance Control*. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 895-900, Albuquerque, New Mexico, April 1997.
- Kaiser 1996  
 Kaiser, K.; Dillmann, R (1996). *Building elementary robot skills from human demonstration*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, USA, 1996.
- Kawamura & Iskarous 1994  
 Kawamura, K.; Iskarous, M. (1994): *Trends in Service Robots for the Disabled and the Elderly*. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp. 1647-1654, Germany, 1994.
- Kazerooni 1996  
 Kazerooni (1996): The human power amplifier technology at the University of California. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 19, pp. 179-187, 1996
- Kazuhiro et al. 1993  
 Kazuhiro, K.; Fujisawa, Y.; Fukuda, T. (1993): *Mechanical System Control with Man-Machine-Environment Interactions*. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 239-244, Atlanta, Georgia, May 2-6, 1993.
- Lamine et al. 1997  
 Ben-Lamine, M. S.; Shibata, S.; Tanaka, K.; Shimizu, A. (1997): *Mechanical Impedance Characteristics of Robots*. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 907-912, Albuquerque, New Mexico, April 1997.
- Längle 1996  
 Längle, T. (1996): *Verteiltes Steuerungskonzept für komplexe inhomogene Robotersysteme*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Prozeßrechen-technik und Robotik, Dec. 1996.
- Lüth et al. 1995  
 Lüth, T.; Nassal, U.; Rembold, U. (1995): *Reliability and Integrated Capabilities of Locomotion and Manipulation for Autonomous Robot Assembly*. Special issue "Research on Robotics and Autonomous Systems in Germany" in Journal on Robotics and Autonomous systems, 14, 1995.
- Mizoguchi et al. 1997  
 Mizoguchi, H.; Sato, T.; Takagi, K. (1997): *Realization of Expressive Mobile Robot*. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 581-586, Albuquerque, New Mexico, 1997.
- Nassal 1996  
 Nassal, U. (1996): *Bewegungskoordination und reaktive Steuerung autonomer mobiler Mehrmanipulatorsysteme*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Prozeßrechen-technik und Robotik, 1996.
- Pritschow et al. 1995  
 Pritschow, G. (1995); Dalacker, M.; Gaenssle, M. (1995): *High Tech at the job site: a Mobile Bricklaying Robot for Automated Construction of Masonry*. IAS Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems, Karlsruhe, pp. 621-626, März 27-30, 1995.
- Raczkowsky et al. 1998  
 Raczkowsky, J., Bohner, P., Burghart, C.; Grabowski, H. (1998): *Planning and Simultion of Medical Robot Tasks*. In Proc. of Medicine Meets Meets Virtual Reality (MMVR'98), San Diego, January 1998.

Sato *et al.* 1994

Sato, T.; Nishida, Y.; Ichikawa, J.; Hatamura, Y.; Mizoguchi, H. (1994): *Active Understanding of Human Intention by Robot through Monitoring of Human Behavior*. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol. 1, pp. 405-414, Germany, 1994.

Schloen 1994

Schloen, J. (1994): *Wissensbasierte Bewegungsausführung für die Montage-automatisierung von Industrierobotern*, Dissertation. Universität Karlsruhe, Institut für Prozeßrechenetechnik und Robotik, 1994.

Schmitt 1997

Schmitt, A. (1997): *Entwurf robuster Algorithmen für die echtzeitfähige parallele Musterverfolgung und -analyse in Videosequenzen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Institut für Prozeßrechenetechnik und Robotik, 1997.

Schraft 1996

Schraft, R. D.; Volz, H. (1996): *Serviceroboter: innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung*. Berlin, Springer 1996.

Spath *et al.* 1994

Spath, D.; Andres, J.; Bock, T.; Steffani, H.F. (1994): *Flexible Automatisierung im "Mauerwerksbau*. In: *Autonome Mobile Systeme*". 10. Fachgespräch Stuttgart, (Eds) Levi, P.; Bräunl, Th.; Springer Verlag, pp. 306-315, Okt. 13-14, 1994.

### 3. Ziele und Arbeitsprogramm

#### 3.1 Ziele

Die Entwicklung der Produktivität in der Baubranche ist in den letzten Jahren deutlich hinter den Werten anderer Branchen zurückgeblieben. Daher ist Bauen wegen der in Deutschland hohen Lohnkosten teuer. Anstelle der Kostensenkung durch Billiglohnkräfte soll dieses Forschungsvorhaben die Grundlage für eine höhere Produktivität der menschlichen Arbeit am Bau legen, indem speziell auf die Erfordernisse des Bauwesens zugeschnittene Kooperationsmethodik zwischen Menschen und Robotern im und am Gebäude entwickelt wird.

Im Bauwesen nimmt die Wichtigkeit von Erneuerungs- gegenüber Neubaufaufgaben kontinuierlich zu, wodurch Ausbauarbeiten an Bedeutung gewinnen. Da diese Arbeiten in nicht maschinell erfaßtem Arbeitsumfeld stattfinden und traditionell mit hohen Toleranzen in der Bauausführung umgehen müßten, ist dort bisher ein Robotereinsatz nicht möglich - eine derartige Umgebung ist zu wenig strukturiert, um ein Umgebungsmodell für Handhabungsautomaten zu definieren. Die anfallenden Arbeiten sind jedoch zu vielfältig und zu komplex, um mit den heutigen Möglichkeiten der Sensorik eine dynamische Umgebungserfassung zu gestatten. Das geplante Vorhaben möchte die komplementären Fähigkeiten von Mensch und Roboter so kombinieren, das als Fernziel ein *sinnvoller Robotereinsatz im Bauwesen* und damit eine *signifikante Produktivitätssteigerung* ermöglicht wird.

Dies erfordert eine geeignete Schnittstelle zur Aufgabenspezifikation. Da die Komplementäreigenschaft der Fähigkeiten von Mensch und Maschine genutzt werden soll, muß diese Aufgabenbeschreibung unterschiedlich detailliert sein: Bei Aufgaben, die im typischen Anwendungsbereich heutiger Roboter liegen, reicht eine Aufgabenspezifikation, in der die Parameter für einen Vorgang übergeben werden, so daß dieser automatisch eine Beschreibung als Folge von Elementaroperationen erstellen kann. Stehen dem Roboter nicht genügend Kontextinformationen zur Verfügung, muß die Aufgabe entsprechen konkreter (in "kleineren Schritten") spezifiziert werden (Bild!). Ziel dieses Projektes ist daher die Entwicklung einer Schnittstelle für ein *skalierbares semiautonomes System*, in dem der Roboter je nach Aufgabe einen unterschiedlich großen Anteil der Spezifikationsinterpretation übernimmt. Das Maximum der Selbständigkeit ist bei der gegenseitige Kontrolle erreicht, da der beteiligte Mensch durch die Kollaboration mit der Maschine immer eine Kontrollfunktion behält.



Die Skalierbarkeit im Moment der Anwendung bedingt eine neue Art der Programmierung, die zwischen der Gleichzeitigkeit der Compliant Motion und der entkoppelten (offline-)Programmierung der vollautomatisierten Fertigungsroboter liegt - eine zeitlich enge Kopplung in der Art einer *"just-in-time-Programmierung"* (Bild A)

### **Teilziel 1: Spezifikation der Bauleistungen**

Für die nötige Skalierbarkeit der Schnittstelle muß die Kluft zwischen den im Bauwesen üblichen Leistungspositionen (Bild B) und den Elementaroperationen für Roboter (Bild C) geschlossen werden. Dies ist aufgrund der freien Formulierung von Leistungspositionen nur manuell möglich. Hierzu ist auf der Basis des in Deutschland üblichen Katalogs von Leistungspositionen (SirADos, Edition AUM) exemplarisch für ein Teilgebiet die Umsetzung in Elementaroperationen zu erstellen, die zunächst noch bezüglich der räumlichen Gegebenheiten auf der Baustelle variabel sein werden (Bild D). Diese Prozeduren für Bauleistungen können dem Roboter als Wissen mitgegeben werden.

### **Teilziel 2: Programmierverfahren**

Die Just-In-Time-Programmierung auf der Baustelle besteht damit in der Wertebelegung der unter Teilziel 1 genannten Variablen. Hierzu muß der Roboter Größen wie Zielpunkte, zu bewegende Objekte etc. erfassen. Das ideale Verfahren bezüglich Intuitivität und Effizienz wird in einer Kombination aus optischer und sprachlicher Schnittstelle der Art "Nimm dieses [+ Geste] Fenster und setze es in diese [+ Geste] Öffnung." erwartet, da dies der üblichen Art der Anleitung entspricht. Das beantragte Projekt wird sich hierbei auf die optische Sensorik beschränken und anstelle der mit Wissen kombinierten Spracheingabe, die ein eigenes Forschungsprojekt rechtfertigen würde, hilfsweise eine menügesteuerte Rechnerschnittstelle einsetzen. Gegenstand dieses Teilzieles ist die Definition des nötigen topologischen Wissens über die Baustelle, um eine für einen angelernten Menschen einfache Programmierung zu erlauben, und darauf basierend die Konzeption eines geeigneten Programmierverfahrens.

### **Teilziel 3: Mensch-Roboter-Schnittstelle**

+++ Auswahl des geeigneten Roboters, Programmierung mit entsprechendem Leistungspositionen- und topologischem Wissen, optische Sensorik +++

### **Teilziel 4: Metrik für Skalierbarkeit**

Zur Validierung des Programmierkonzeptes und damit des Projekterfolges soll der Versuch unternommen werden, auf Basis der Projekterfahrungen ein Bewertungsverfahren für die Skalierbarkeit des Roboters zu definieren. Hiermit kann eine Einordnung des erzielten Ergebnisses in das Gesamtproblem erfolgen und somit eine Einschätzung der noch bevorstehenden Aufgaben vorgenommen werden.

+++ Ausblick: Mit passendem Datenbestand kann anstelle einer zentrale Fertigung ein Großteil der Endmontage auf die Baustelle verlagert werden (dezentrale Fertigung, one-of-a-kind Baustelle). Hierbei leiten die Fertigungsmaschinen den Menschen an. +++

+++ Ausblick: Einsatz in Demontage, Wartung +++

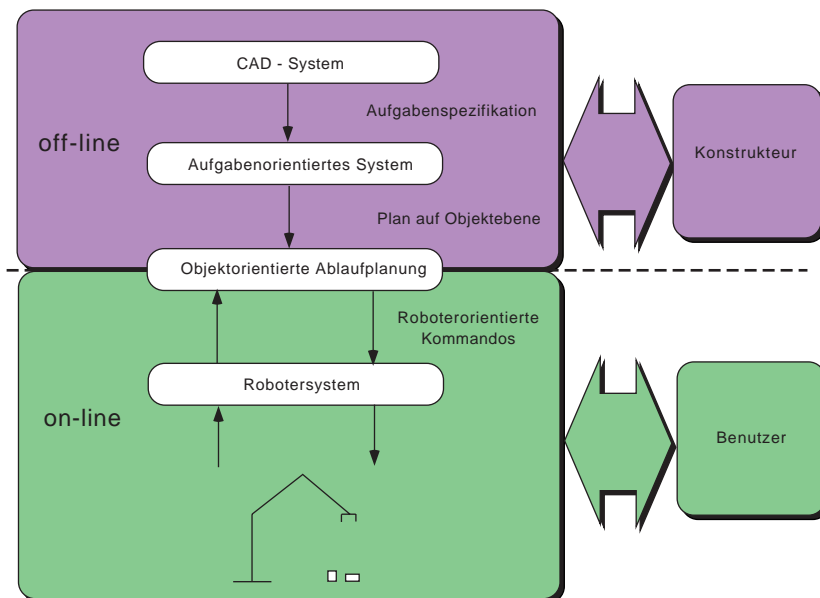


Abbildung 2: Implizite Programmierung

### 3.2 Arbeitsprogramm

#### 1. Grundlagen/ Konzept:

- Identifikation geeigneter Tätigkeiten auf der Baustelle, Elementaroperationen für Schnittstelle aus Tätigkeitsbeschreibung im Bauwesen ableiten. (ifib)
- Interaktionskonzept entwickeln
- Identifikation geeigneter Funktionen für einen vorhandenen Roboter aus den Tätigkeiten (IPR)

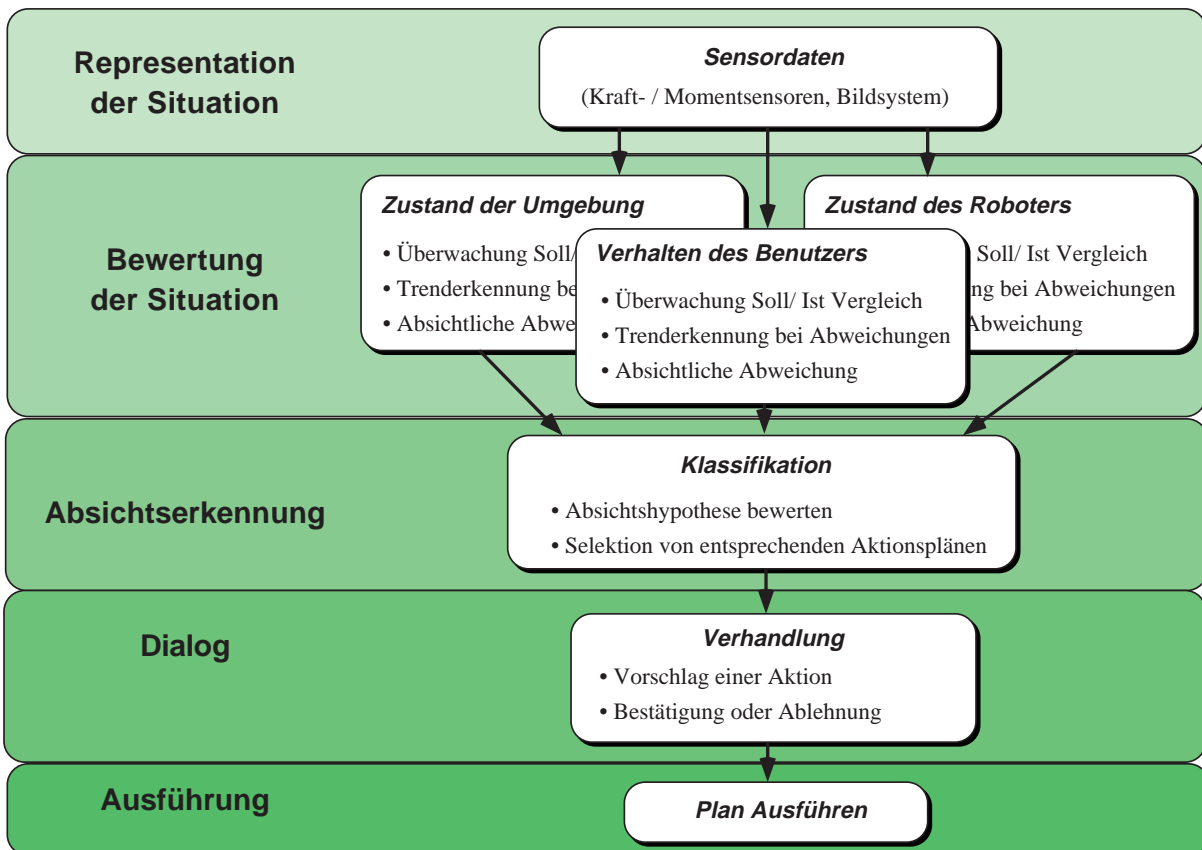
#### 2. Nachweis der Eignung des Verfahrens:

- Metrik für Skalierbarkeit des Systems als 1. Schritt zur M-R-Teambeschreibung
- Simulationskonzept entwickeln, insbesondere Einbindung von Sensoren
- Modellierung von Toleranzen/Unsicherheiten (z.B. der realen Umgebung)
- Visualisierung der Interaktion (VR?)
- danach Validierung der Interaktion über Simulation / Visualisierung

#### 3. reale Anwendung:

- Roboter programmieren
- Testumgebung

#### 4. Dokumentation (parallel zu 1.-3.)



### 3.3 Untersuchungen am Menschen

- keine -

### 3.4 Tierversuche

- keine -

### 3.5 Gentechnologische Experimente

- keine -

## 4. Beantragte Mittel

### 4.1 Personalbedarf

a) 2 wiss. Mitarbeiter nach BAT IIa für 3 Jahre (1 am IPD, 1 am ifib).

b) 2 stud. Hilfskräfte im Umfang von 83 Std/Monat für 3 Jahre für Implementierungsarbeiten.

### 4.2 Wissenschaftliche Geräte

- entfällt -

### 4.3 Verbrauchsmaterial pro Jahr:

Für Druckerverbrauchsmaterial: pro Institut 2000,- DM.

Summe 4.3: 4000,- DM

#### **4.4 Reisen pro Jahr:**

Reisekosten: 1.000,- DM pro Institut sowie einmalig 1.900,- DM = 950 DM p.a.

Der Betrag von 1.900,- DM dient einem einwöchigen Forschungsaufenthalt einer Person bei der Western Connecticut State University (Flug 1000,- sowie 6 Tagessätze à 150,- DM).

Der Betrag von 1000,- DM p.a. und Institut dient zur Teilnahme an Veranstaltungen und für Kontakte zu weiteren, vorwiegend nationalen Gruppen, die sich mit projektnahen Themen befassen .

Summe 4.4: 2950,- DM

#### **4.5 Sonstige Kosten**

- keine -

### **5. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens**

#### **5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppen**

#### **5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern**

IFIB

Es besteht für das Vorhaben relevante wissenschaftliche Kooperation im Bereich computergestützter Planungssysteme zwischen dem IFIB und folgenden Institutionen:

- Carnegie Mellon University, Department of Architecture (Pittsburgh PA), Center of Building Performance and Diagnostics
- Universität Freiburg, Institut für Informatik und Gesellschaft
- Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme
- Western Connecticut State University und University of Rhode Island, USA, im Bereich verteilter Datenhaltung

IPR

#### **5.3 Auslandsbezug**

#### **5.4 Apparative Ausstattung**

Über das lokale Hochschulnetz Karlsruhe, an das die beiden Lehrstühle angeschlossen sind, ist eine Kopplung der Arbeitsplatzrechner beider Karlsruher Institute vorhanden.

#### **5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben**

Aus den Haushaltszuweisungen von Landesmitteln an die Lehrstühle können je DM 500,- für Geschäftsbedarf zur Verfügung gestellt werden. Die Lehrstühle stellen außerdem die Mittel für den Betrieb (insbesondere Wartung) der unter 5.4 genannten Ausstattung zur Verfügung.

#### **5.6 Sonstige Voraussetzungen**

- keine -

### **6. Erklärungen**

6.1 Es besteht keine thematische Beziehung zwischen diesem Vorhaben und Arbeiten in einem am Ort befindlichen Sonderforschungsbereich.

6.2 Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn einer der Lehrstühle einen solchen Antrag stellt, wird er die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.

6.3 Der Vertrauensdozent der DFG an der Universität Karlsruhe, Herr Prof. Dr. rer. nat. Elmar Dormann, wurde von der Antragstellung unterrichtet.

6.4 - entfällt -

## **7. Unterschriften**

(Prof. Dr. ès. sc. tech. Niklaus Kohler, ifib)

(Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn, IPR)

## **8. Verzeichnis der Anlagen**

- entfällt-