



Europäische Akademie

zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Direktor:
Professor Dr. Carl Friedrich Gethmann

Perspektiven der Robotik. Überlegungen zur Ersetzbarkeit des Menschen

von

Michael Decker

November 1997

2. unveränderte Auflage (Mai 2001)



Europäische Akademie

zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Direktor:
Professor Dr. Carl Friedrich Gethmann

Perspektiven der Robotik. Überlegungen zur Ersetzbarkeit des Menschen

von

Michael Decker

November 1997

2. unveränderte Auflage (Mai 2001)

Die Schriften der „Grauen Reihe“ umfassen aktuelle Materialien und Dokumentationen, die von den Wissenschaftlern der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH laufend erarbeitet werden. Die Publikationen der „Grauen Reihe“ werden als Manuskripte gedruckt und erscheinen in loser Folge im Selbstverlag der Europäischen Akademie. Sie können über die Europäische Akademie auf schriftliche Anfrage hin bezogen werden.

Herausgeber



Europäische Akademie

zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Wilhelmstraße 56, D-53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler

Telefon: ++49 - (0)2641 - 973 - 300, Telefax - 320

e-mail: europaeische.akademie@dlr.de

Direktor:

Professor Dr. Carl Friedrich Gethmann (V.i.S.d.P.)

ISSN 1435-487 X

Redaktion:

Dr. Stephan Lingner

Druck:

Druckerei Martin Warlich, Bad Neuenahr-Ahrweiler

Vorwort

Der vorliegende Text stellt einen Vorschlag für ein zukünftiges Projekt der **Europäischen Akademie** dar und ist das Ergebnis einer ersten Sondierung zum Arbeitsthema "Robotik. Ersetzbarkeit des Menschen". Dieser Entwurf soll der Diskussion und Abstimmung und damit der Projektvorbereitung dienen.

Daher werden im ersten Kapitel Grundlagen der Robotik in Verknüpfung mit der Künstlichen Intelligenz dargestellt. Im zweiten Kapitel wird anhand von Beispielen der Status quo skizziert. Im dritten Kapitel schließlich wird die Frage nach der Ersetzbarkeit des Menschen gestellt und ein Ansatz für eine mögliche Strukturierung des Problems präsentiert.

Bad Neuenahr-Ahrweiler, im November 1997

Michael Decker

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	7
Abstract	8
1 Robotik und Künstliche Intelligenz	9
1.1 Wissensrepräsentation	10
1.1.1 Wissensbasen und Expertensysteme	10
1.1.2 Künstliche Neuronale Netze	12
1.2 Sprachverstehende Systeme	15
1.3 Autonome Roboter	15
1.4 Künstliche Intelligenz und Künstliches Leben	16
1.5 Ist Robotik mehr als eine Anwendung der KI ?	18
2 Robotik am Beispiel dreier Schwerpunkte	20
2.1 Natürlichsprachige Systeme	20
2.2 Autonome Systeme	22
2.3 Roboterarm und Roboterhand	25
2.4 Spotlights	27
3 Ersetzbarkeit des Menschen	30
3.1 Formen der Schnittstelle Mensch/Maschine	30
3.2 Formen der Position des Menschen innerhalb des Systems	34
3.3 Typen der Nicht-Ersetzbarkeit	36
3.4 Diskussion	39
Literatur	41
Anhang	44

Zusammenfassung

Roboter haben sich bereits erste Nischen im Markt der Dienstleistungen erobert. Ausgerüstet mit Sensoren, Bewegungsapparaten und einer robusten Steuerung übernehmen sie Aufgaben, die sonst von Menschen erledigt werden müßten. Die Fortschritte der die Robotik beeinflussenden Forschungsgebiete Künstliche Intelligenz, Mechatronik und Mikrosystem-Technik scheinen es zukünftig zu ermöglichen, daß Handlungen von Maschinen übernommen werden, die bisher ausschließlich von Menschen durchgeführt wurden. Es gilt daher zu fragen, ob es Bereiche gibt, in denen der Mensch nicht ersetzt werden soll und anhand welcher Kriterien dieses gerechtfertigt wird.

Um die Fragestellung zu strukturieren, werden Kriterien bestimmt, nach denen die Ersetzbarkeit des Menschen untersucht werden könnte. Orthogonal zu diesen Kriterien werden relative Leistungsstufen des Gesamtsystems Mensch/Maschine angegeben. Ein zur Debatte stehendes singuläres System könnte anhand dieser zweidimensionalen Struktur klassifiziert werden.

Abstract

Robots have already occupied some niches in the market of services. Equipped with sensors, mobility and robust control, they do jobs which would otherwise have to be done by human beings. The techniques influencing robotics, such as Artificial Intelligence, Mechatronics and Microsystems, are making very fast progress. In future, it seems to be possible that jobs are carried out by robots which have previously been done exclusively by human beings. It is therefore necessary to ask whether one can identify areas where human beings should not be replaced, and according to which criteria this can be justified.

In order to structure the problem, we define criteria which could be relevant for studying the replaceability of human beings. Orthogonal to these criteria, we specify levels of skill of the total system human being/robot. A particular system could be classified within this two-dimensional structure.

1 Robotik und Künstliche Intelligenz

Als Einführung diene ein Blick in die Enzyklopädie (BROCKHAUS, 1992):

„Robotik ist eine wissenschaftlich-technische Disziplin, die sich mit der Konstruktion, Programmierung und dem Einsatz von Robotern befaßt. Besondere Bedeutung kommen dabei der Sensorik und der Bild- bzw. Mustererkennung zu; die Robotik ist daher eng mit den Forschungsgebieten der künstlichen Intelligenz verknüpft. Das Bilderkennen und „Bildverstehen“, also das Begreifen der inhaltlichen Bedeutung der z.B. über optische und taktile Sensoren erfaßten Konturen und deren Lage im Raum, sind Voraussetzungen für das autonome Verhalten von Robotersystemen. Für die Bilderkennung ist eine entsprechende Programmierung der Robotersysteme erforderlich, die über die Benutzerschnittstelle (Mensch-System-Schnittstelle) in eine Robotersteuerung eingegeben werden kann. [...] Mit zukünftigen Planungssystemen der künstlichen Intelligenz soll es möglich sein, die Bewegungsabläufe eines Roboters aus den sensorisch erfaßten Umweltzuständen in Verbindung mit den Zielvorgaben abzuleiten.“

Industrieroboter, die z.B. in den Montagehallen der Automobilindustrie Schweißaufgaben und das Tragen von schweren Teilen (Batterie/Reserverad) übernehmen, sind im wesentlichen ortsfest und folgen festen Aktionsplänen, die ihnen von einem Programmierer eingegeben wurden. Der Roboter 'weiß'¹ dann z.B. mit welchem Bewegungsablauf er das Reserverad in ein bestimmtes Karosseriemodell einlegen muß. Autonome Roboter sind in der Lage, ein vom Bediener definiertes Ziel zu verfolgen, wofür sie sich ihre Aktionspläne selbst aufstellen, unter

¹ In der Robotik findet man sehr häufig anthropomorphe Redeweisen dieser Art: „Der Roboter weiß“, „Der Roboter will“. Darüber hinaus werden Begriffe wie „Erkennen“, „Wissen“, etc. verwendet, die in ihrer Geltung bei der Beschreibung von Robotern hinterfragt werden müssen. Diese Begriffe werden im Text durch Hochkommata gekennzeichnet. Die Notwendigkeit der Begriffsuntersuchung wird in der Diskussion (Abschnitt 3.4) nochmals aufgegriffen.

Berücksichtigung der von ihnen selbst sensorisch erfaßten Umwelt. Was die Entwicklung der Steuerungsprozesse angeht, werden Roboter häufig als Anwendung der Künstlichen Intelligenz angesehen.

Künstliche Intelligenz behandelt Themen wie Wissensrepräsentation, Problemlösen, Suchen und Planen. Ihre Anwendungen sind Expertensysteme, natürlichsprachige Systeme und (autonome) Roboter. Stellt man sich z.B. einen Roboter vor, der Gäste in einem großen Institut an der Pforte abholt und dann zu dem gewünschten Gesprächspartner bringt, so ergibt sich die Aufgabenstellung, daß der Roboter das 'Wissen' über die Struktur des Instituts benötigt (Expertensystem), daß er die Frage des Gastes '*inhaltlich verstehen*' muß (natürlichsprachiges System) und daß er den Gast, sich *autonom bewegend*, zu dem Zimmer des Gesprächspartners geleitet (autonomer Roboter). Man erkennt hieran, daß Robotik die Anwendungen der Künstlichen Intelligenz einsetzt, wenn sie einen Roboter konstruieren will, der in komplexer Umwelt „agieren“ können soll. Diese Anwendungen werden im folgenden vorgestellt.

1.1 Wissensrepräsentation

In der Wissensrepräsentation werden zwei verschiedene Strategien eingesetzt, zum einen wird Wissen möglichst gut strukturiert, um es in großen Wissensbasen zu speichern, zum anderen wird Wissen in neuronalen Netzen gesichert, die als ein Modell des Gehirns angesehen werden (DENGEL, 1994).

1.1.1 Wissensbasen und Expertensysteme

Für die Bereitstellung in Wissensbasen wird Wissen in kleine Bestandteile (Fakten) bzw. Zusammenhänge (Regeln) zerlegt. Für inhaltlich begrenzte Fachgebiete kann mit solchen Wissensbasen bereits gut Auskunft gegeben werden, denn mit einer abzählbar großen Anzahl von Regeln (z.B. wenn-dann-Verknüpfungen) kann man ein Expertengebiet

abdecken. Diese Systeme nennt man Expertensysteme, sie werden z.B. bei der Automobil-Inspektion eingesetzt. Benötigt wird dafür ein Experte, der die Wissensbasis mit bereits strukturiertem Wissen füllt. Das Problem muß logisch lösbar sein und die Situation muß ohne Allgemeinwissen beurteilbar sein.

Die Implementierung von Allgemeinwissen stellt das Hauptproblem bei der Wissensrepräsentation dar. Man versucht daher Wissenszusammenhänge in Rahmen zusammenzufassen und diese Rahmen in Hierarchien zu gliedern. Beispielsweise ist dann der Rahmen `mein_Auto` (enthält Marke, Modell, Farbe, Ausstattung, etc.) eine Ebene unter dem Rahmen `ein_Auto` (der die allgemeinen Kriterien eines Autos enthält) angeordnet. Handlungsabläufe werden in Skripts dargestellt, auch diese können in Hierarchien aufgebaut sein. Das Skript „Restaurantbesuch“ enthält dann die Skripts „Platz nehmen“, „Bestellen“, „Essen“, „Bezahlen“, letzteres enthalte die Handlungen „Ober rufen“, „Rechnung erbitten“, etc.. Um weitere Strukturen in Wissensbasen zu erzeugen, werden semantische Netze konzipiert, in denen dann Relationen zwischen z.B. Rahmen und Handlungen durch gerichtete Verbindungen dargestellt werden. Typische Verbindungen sind `Teilmenge_von` (Generalisierung), `Exemplar_von` (Klassifikation) und `Teile_von` (Aggregation). Wird bei einem Lösungspfad die Verbindung entgegen der Richtung durchlaufen, so ändert sich die Semantik entsprechend: `ist_Teil_von` wird dann `hat_Teil`. Die Darstellung komplexer Sachverhalte in semantischen Netzen wird selbst schnell sehr komplex, worin sich ebenfalls die Problematik „Allgemeinwissen“ widerspiegelt.

Großer Vorteil einer durch Regeln strukturierten Wissensbasis ist, daß das Programm daraus Erklärungen ableiten kann. Stellt der Benutzer Wie- oder Warum-Fragen, so kann das System diese durch Vorwärts- oder Rückwärtsverknüpfungen beantworten. Müssen bei der Autoreparatur beispielsweise die Bremsbeläge gewechselt werden, so fordert das Expertensystem auf: „Demontiere das Vorderrad“. Stellt man dann die Frage „Warum soll ich das Vorderrad ausbauen?“, so findet das System in seiner Wissensbasis die Regel: „Wenn Bremsbeläge ausbauen, dann Rad demontieren“ und begründet seine Aufforderung, indem es die Be-

dingung der Subjunktion als Antwort ausgibt: „Um die Bremsbeläge ausbauen zu können“.

Problemlösen, Suchen und Planen sind die Hilfsmittel mit denen Handlungsanweisungen aus einer großen Wissensbasis (z.B. einem semantischen Netz) erhalten werden können. Problemlösen ist zunächst ein inhaltliches Problem, es gilt den Ausgangszustand zu definieren, das Ziel und eventuell bekannte Zwischenzustände. Dieses Ziel wird dann durch geeignete Suchalgorithmen gesucht. Das Problem wird in einem Zustandsgraph mit Start- und Endknoten dargestellt, die Knoten entsprechen Zuständen, die Kanten² Aktionen. Im allgemeinen führen mehrere Wege zum Ziel. Ist das Problem in einem solchen Zustandsraum dargestellt, sind alle möglichen Wege potentielle Lösungen, wobei Schleifen und doppeltes Durchlaufen der selben Strecke auf einem Lösungsweg als unsinnige Varianten ausscheiden sollen. Beim Planen wird zunächst eine Zweck-/Mittel-Tabelle aufgestellt, um zentrale Entscheidungen zu erkennen. Beispielsweise wird eine weite Reise mit dem Flugzeug so geplant, daß man die Zubringerdienste vom und zum Flughafen um die Flugzeiten herum plant. Es wird also ein Knoten des alle Lösungen enthaltenden Zustandsgraphen ausgewählt (Flug), über den der Lösungsweg führen muß.

1.1.2 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze (KNN) modellieren menschliche Denkprozesse³ um Wissen zu speichern. Aufgrund der Komplexität des menschlichen Gehirns muß die Modellbildung auf der Basis einer extrem vereinfachten Abstraktion des physiologischen Aufbaus des Gehirns durchgeführt werden. Einen möglichen Ansatz nennt man Konnektionismus (DENGEL, 1994).

² Das sind die Verbindungen zwischen den Knoten des Netzes.

³ Das Ziel ist die robuste Steuerung von Robotern, diese muß nicht „wie ein Gehirn“ funktionieren.

Im Rahmen der üblichen Beschreibung besteht das Gehirn aus Neuronen (etwa 100 Milliarden), die sich grob gliedern lassen in Eingangselemente, die von außen einwirkende Reize aufnehmen, Ausgangselemente, die Informationen an Drüsen, Muskeln und Zellen weiterleiten, und die Elemente der Zwischenschicht, die die 'Information' verarbeiten. Letztere ist die wichtigste Ebene, die allerdings am wenigsten erforscht ist. Das Neuron besteht aus einem Zellkörper und einer Anzahl vorstehender Ausläufer, den Dendriten. Durch sie werden ankommende Signale⁴ anderer Nervenzellen aufgenommen. Wenn bei einem Neuron die Summe der eingehenden Impulse eine Erregung verursachen (das Membranpotential in der Zelle ist dann so weit erhöht, daß ein bestimmter Schwellenwert überschritten ist), dann „feuert“ das Neuron seinerseits einen Impuls über seine Ausgangsverbindung, das Axon, ab. Über sogenannte Synapsen ist das Axon mit vielen (Größenordnung 1000) anderen Zellen verbunden. Der Impuls hat auf diese durch den Austausch von Neurotransmittern eine potential-erhöhende oder -senkende Wirkung.

Analog dazu werden bei KNN Verarbeitungselemente aufgebaut. Bei einem Element ('Zelle') kommen Signale an, diese werden gewichtet (mit Faktoren multipliziert) und dann summiert. Liegt die Summe über einem bestimmten Schwellenwert, repräsentiert durch die Aktivierungsfunktion (z.B. Sprungfunktion, Sigmoidfunktion), sendet die 'Zelle' ein Ausgabesignal an alle nachgeschalteten Zellen. KNN sind aus mehreren Schichten aufgebaut, in der Regel ist eine Zelle der Schicht i mit allen Zellen der Schicht $i+1$ verbunden. KNN müssen trainiert werden, wobei sich das Training in folgende Schritte gliedert:

1. Eingabe von Testdaten und erwarteten Resultaten.
2. Verarbeitung der Daten, d.h. Weiterleitung durch die verborgenen Schichten an die Ausgabeschicht.
3. Vergleich der tatsächlichen mit den erwarteten Resultaten.
4. Rückkopplung von Impulsen zur Anpassung von Gewichten zwischen den einzelnen Schichten.
5. Zurück zu 2.

⁴ Das Nervensignal ist elektrischer und chemischer Natur.

Das Training kann man also als Anpassung der Wichtung verstehen. Wie die Wichtung verändert wird, geht aus einer sogenannten Lernregel hervor. KNN haben somit drei wesentliche technische Komponenten:

- Aufbau (z.B. Anzahl der „Zellen“ pro Schicht)
- Aktionsfunktion (gibt die Reaktion der einzelnen Zelle wieder)
- Lernregel (gibt die Regeln zur Gewichteverschiebung beim Training an)

Beispiel für die Anwendung künstlicher neuronaler Netze ist das Vorlesen von Texten. Dazu gibt man dem Computer 1000 Worte mit der richtigen Aussprache ein. Anschließend ist dieser in der Lage einen Text in dieser Sprache vorzulesen. Den Lernerfolg kann man dabei gut beurteilen, indem man den selben Text bereits nach der Vorgabe von nur 20 Wörtern (völlig unverständlich) und nach 200 Wörtern (Ähnlichkeit bereits vorhanden) vorlesen läßt.

Vorteile der KNN sind erstens ihre Robustheit, denn das Wissen (z.B. über die richtige Aussprache eines Wortes) ist über das gesamte Netz verteilt. Der Ausfall einiger Zellen hat somit nur einen geringen Leistungsabfall zur Folge. Zweitens die Parallelisierungsmöglichkeiten, denn die parallele Datenverarbeitung ist dem Modell impliziert. Im Idealfall wäre jeder Zelle ein Prozessor zugeordnet. Drittens schließlich das Lernen, welches explizites Programmieren im Sinne einer Beschreibung der Transformationen im Netz nicht benötigt. Als Nachteile stehen dem gegenüber die hohen Kosten durch die Speicherung großer Datenmengen auf schnellen Medien und der extrem hohe Rechenzeitbedarf, da bei größeren Netzkonfigurationen ein mehrmonatiges Training nötig ist. Außerdem können KNN keine Wie- oder Warumfragen beantworten, weil das Wissen nicht in direkten Verknüpfungen strukturiert ist (BRUNAK & LAUTRUP, 1993; MAZZETTI, 1992; RITTER ET AL., 1991).

1.2 Sprachverstehende Systeme

Das Wissen um allgemeine Zusammenhänge ist auch das Hauptproblem beim Sprachverständnis. Vergleicht man die Sätze: „Das ist meine Uhr“ und „ich meine die Uhr geht falsch“, so muß die richtige Bedeutung des Wortes „meine“ aus dem Satzkontext geschlossen werden. Der Satz: „Ich beobachte den Mann mit dem Teleskop“ kann nur verstanden werden, wenn im Kontext klar wird, ob das „Ich“ oder der Mann das Teleskop hat. Schließlich läßt sich der Satz: „Sie wunderte sich, warum alle schneller als fünfzig fahren“ nur verstehen, wenn man Wissen um das allgemein bekannte Tempolimit in deutschen Städten hat. Die syntaktische Analyse schlüsselt einen Satz nach Subjekt, Prädikat, Objekt, etc. auf und kann so manche Mehrdeutigkeiten (vgl. „meine“) schon entscheiden. Allerdings können inhaltlich völlig unsinnige Sätze syntaktisch korrekt sein. Um den Sinn des Satzes erkennen zu können, muß eine semantische Analyse durchgeführt werden. Man unterscheidet hier die schwache semantische Analyse, die die lexikalische Bedeutung eines Wortes einbringt (z.B. „Pferd“: Substantiv; Lebewesen, vierbeinig, Reittier,...), und die starke Semantik, die den tatsächlichen Satz-, bzw. Textkontext berücksichtigt. Hier spielt wieder das Wissen um Allgemeines eine Rolle, denn mit dem Satz: „Er lud sie zum Essen in ein Restaurant ein“, verbindet jeder Mensch, daß auch „Er“ dort etwas ißt (dieser Sachverhalt könnte durch das Skript „Restaurantbesuch“ geklärt werden).

Bei akustischsprachigen Systemen kommt darüber hinaus noch die Problematik des Hörverständnisses hinzu, denn gesprochene Sprache trennt die Wörter schlecht, enthält keine Satzzeichen, dafür aber nicht selten unvollendete Sätze, dialektische Besonderheiten und „ähs“.

1.3 Autonome Roboter

Ein Roboter gilt als autonom, wenn er sich in komplexen, ihm unbekanntem Umgebungen zurechtfinden kann. Dafür muß er seine Umgebung erfassen können, was z.B. mit Videokameras oder Laserscannern

realisiert wird. Um die tatsächliche Struktur der Umwelt aus einem Videobild erkennen zu können, ist es nötig, das Bild mit Bildverarbeitungsmethoden zu analysieren. Nur so lassen sich Graustufenwechsel entlang einer Strecke im Bild vorspringenden oder zurückweichenden Kanten in der Umwelt zuordnen. Soll sich der Roboter autonom bewegen, so muß er mit einem Fortbewegungsmechanismus (z.B. Beine, Räder, etc.) ausgerüstet sein. Dessen Steuerung muß mit den Erkenntnissen über die Umgebung abgeglichen werden, um Zusammenstöße zu vermeiden. Soll der Roboter auch in die Umgebung eingreifen, dann wird er mit einem Manipulator (z.B. einem Arm mit Greifer) ausgerüstet. Auch dieser muß mit den anderen Systemkomponenten verknüpft werden, denn zum einen erfaßt die Kamera, was aufgegriffen werden soll, zum anderen muß sich der gesamte Roboter so positionieren, daß das Objekt im Wirkungsbereich des Manipulators liegt. Außerdem soll natürlich auch der Manipulator nirgends anstoßen. Die Gesamtsteuerung des Roboters wird nun in einer Hierarchie aufgebaut. Einzelne Module steuern ihren Aufgabenbereich allein, dadurch sind kurze Regelzeiten gewährleistet. Gleichzeitig geben sie bestimmte Parameter ihres Regelmechanismus ständig an andere Module und an eine oder mehrere übergeordnete Ebenen weiter. Auf der übergeordneten Ebene wird dann der Plan für das Zusammenspiel der einzelnen Module konzipiert, der zum Erfüllen der Aufgabe führt.

1.4 Künstliche Intelligenz und Künstliches Leben

In jüngerer Zeit werden Künstliche Intelligenz (KI) und Künstliches Leben (KL) unterschieden. W. Kinnebrock (KINNEBROCK, 1996) differenziert beispielsweise:

„Das Gebiet „Künstliche Intelligenz“ untersucht intelligente Objekte, deren Intelligenz mit Hilfe einer Wissensbasis realisierbar ist. KI ist wissensbasiert. Objekte dieser Art sind fast immer auf einem Rechner in einer virtuellen Welt simulierbar. KI ist in diesem Sinne wissensbasiert.“

Das Gebiet „Künstliches Leben“ untersucht Objekte, die sich in einer Umwelt (real oder virtuell) befinden und mit dieser Information und Signale austauschen. Das Objekt paßt sich der Umwelt so an, daß es in optimaler Weise in dieser existieren kann (Selbsterhaltung)⁵. Dieses adaptive Verhalten ist intelligent und lernfähig. KL ist in diesem Sinne verhaltensbasiert.“

Kinnebrock unterscheidet des weiteren in der Programmierweise, die er in der KI als top-down-Programmierung bezeichnet, welche ausgehend von abstrakten Handlungsmustern das momentan notwendige Roboterverhalten zu generieren sucht, während bei der bottom-up-Methode des KL einfache Verhaltensregeln sich zu emergentem Verhalten des Roboters summieren. Sicherlich lassen sich die im folgenden Kapitel vorgestellten Anwendungen der einen oder anderen „Kunst“ eher zuordnen, diese Zuordnung soll aber nicht Bestandteil dieses Beitrages sein.

Das folgende Beispiel soll den Ansatz des KL verdeutlichen. An der Universität Brüssel wurde ein Roboter-Ökosystem geschaffen (STEELS, 1996a; STEELS ET AL., Manuskript). Es handelt sich dabei um eine Umwelt in der mehrere Roboter 'agieren', die manchmal kooperieren und manchmal konkurrieren müssen, wobei die Umwelt die Roboter gewissen Zwängen aussetzt. Kausal verantwortlich für das Verhalten der Roboter ist ein wachsendes Repertoire von adaptiven Strukturkomponenten, sogenannter Verhaltenssysteme.

„Dabei verfolgen wir das Ziel, Szenarien zu entwickeln und zu testen, die die progressiven Entwicklungsschritte intelligenter Subjekte verdeutlichen, so wie Biologen und Chemiker Szenarien zum Ursprung des Lebens untersuchen [...] intelligentes Verhalten - also Individualität, sprachliche Kommunikation, Kooperation und so fort - soll aus dem Druck des Ökosystems und aus strukturbildenden Prozessen wie Selbstorganisation und Selektion erwachsen.“ (STEELS, 1996a)

⁴ Das Nervensignal ist elektrischer und chemischer Natur.

Ein Experiment in diesem Ökosystem untersucht die Entstehung von Diversität bei Robotern. Dafür werden identische Roboter eingesetzt, die kooperativ gegen Parasiten 'vorgehen', die ihnen die Energie des Ökosystems streitig machen. Parasiten können durch Anstoßen für eine Zeit ausgeschaltet werden. Zunächst 'wissen' die Roboter nicht⁶, wieviele Parasiten sie anstoßen können (d.h. wieviel sie 'arbeiten' können), bevor sie wieder an der Ladestation Energie auftanken müssen. Folglich muß ihr Verhalten adaptiv sein. Da das Verhalten der Roboter gekoppelt ist, profitieren alle von den ausgeschalteten Parasiten. Dadurch kann sich eine Verhaltensdifferenz - ein Roboter arbeitet etwas mehr als ein anderer - verstärken, was schließlich zu zwei verschiedenen Typen von Robotern führt, von denen einer signifikant mehr Arbeit leistet.

1.5 Ist Robotik mehr als eine Anwendung der KI ?

„Die KI versucht das Wesen der menschlichen Denkprozesse, des Lernens, der Sprache und der Verschlüsselung von Wissen zu verstehen [...] Die KI hat nach den frühen Anfangserfolgen in den letzten Jahren viele Rückschläge erfahren. Jedoch hat sich die Haltung zu dieser Wissenschaft stark verändert. Die KI oder besser: die maschinelle Verarbeitung von Wissen ist heute viel problemorientierter geworden.“(DENGEL, 1994)

In vielen allgemeinen Lehrbüchern der KI wird die Robotik als Anwendung angeführt, als der Ort, an dem die Errungenschaften der KI ausprobiert werden (DENGEL, 1994; KINNEBROCK, 1996; RITTER ET AL., 1991). Es stellt sich aber die Frage, ob sich dieses Verhältnis nicht inzwischen umgekehrt hat. Ob nicht die Robotik ihrerseits allgemein Anforderungen stellt, z.B. nach Möglichkeiten für die Steuerung autonomer Roboter fragt. Die KI ist dann eine Disziplin, die diese Anforderungen vielleicht erfüllen kann. Für den Robotiker ist es aber von

⁶ In diesem Beispiel ist besonders interessant, welches Wissen in die Robotersteuerung investiert wird. Die metaphorische Sprache (vgl. Fußnote 1) wird hier besonders deutlich.

nachrangiger Bedeutung, ob diese Systeme menschliche Denkprozesse abbilden oder nicht. Weiterhin ist die Steuerung des Roboters nur *eine* Problemstellung der Robotik. Der Aufbau eines Roboters stellt höchste Anforderungen an die (Feinst-)Mechanik und die Elektronik. Analoges gilt für die Sensorik. Zu diesen Fragestellungen liefert die KI keine Antworten. Robotik als Anwendung der KI zu betrachten ist somit sicher zu eng. Der umgekehrte Weg scheint hier plausibler: Die Technik Robotik formuliert die Probleme und erörtert „rückwärts“ die wissenschaftlichen Disziplinen, die für diese Probleme Lösungen anbieten können. KI ist dann sicherlich eine dieser Disziplinen. Daraus kann sich ein Vorteil für die KI ergeben, da sie ihre Ziele anhand der Zwecke der Robotik definieren kann und so Kriterien erhält, anhand derer sie über Erfolg und Mißerfolg entscheiden kann.

2 Robotik am Beispiel dreier Schwerpunkte

Wenn es gilt, Sinneswahrnehmungen und Fertigkeiten zu beurteilen, dann ist der Mensch geneigt, sich selbst als Vergleichsobjekt heranzuziehen. Robotiker müssen daher damit leben, daß Ihre Erfolge an einem sehr hohen Maßstab gemessen werden. Vielleicht hat die Forschungsrichtung das Ziel, Roboter z.B. genauso gut wie einen Menschen sehen und wahrnehmen zu lassen, sie muß dies allerdings nicht auf die gleiche Weise realisieren. Im folgenden sollen nun mögliche Ansätze der Robotik für die Schwerpunktthemen Natürlichsprachiges System, autonomes System und Manipulator anhand von Beispielen erklärt werden. Im vierten Teil dieses Abschnitts werden kurz weitere interessante Projekte der Robotik skizziert.

2.1 Natürlichsprachige Systeme

Die grundlegenden Probleme des Verständnisses von natürlicher (gesprochener oder geschriebener) Sprache wurden im ersten Kapitel erläutert. Sie lassen sich zusammenfassen unter dem Oberbegriff des „fehlenden Allgemein- oder Kontextwissens“ der Computersysteme. Will man die Leistung von natürlichsprachigen Systemen erkennen, so bieten sich Übersetzungssysteme an, denn die korrekte Übersetzung eines Textes setzt das Verständnis desselben voraus. Kommerzielle Übersetzungsprogramme kommen hier über den Status einer Übersetzungshilfe nicht hinaus. So übersetzt das Programm T1 von Langenscheidt den Text aus der Menschenrechtsdeklaration: „All human beings are born free“ mit: „Alle Menschen sind umsonst geboren“.

Wie erfolgreich Programme sein können, die Verständnis von Sprache vortäuschen, zeigt das Beispiel ELIZA (WEIZENBAUM, 1976). Es handelt sich dabei um ein Psychoanalyseprogramm, das im wesentlichen den letzten, vom Patienten gesprochenen Satz in eine Warum-Frage umformuliert. Ist ihm das nicht möglich, so fragt es nach einem Beispiel. Tritt der Name eines Familienmitgliedes auf (z.B. „Mutter“), so sagt das System: „Erzählen Sie von Ihrer Mutter“. ELIZA war so er-

folgreich, daß es manche Patienten weiterhin benutzten, nachdem man ihnen gesagt hatte, daß das Programm nichts von dem versteht, was man sagt, und schon gar keine psychologischen Kenntnisse hat. Dieses Beispiel zeigt, daß man bereits mit dem Bezug auf einzelne Worte des zuvor Gesagten ein Gespräch fortsetzen kann. Aber das Erreichen des Zieles einer Redehandlung setzt das inhaltliche Verständnis der gesamten Rede voraus.

Das Verbmobil, welches vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI) in Kaiserslautern und Saarbrücken entwickelt wurde, hat sich als Ziel das Verständnis und die Übersetzung von gesprochener Sprache gesetzt (WAHLSTER, 1997; BLOCK, 1997). Der Verbmobil-Demonstrator (Umfang 1292 Wörter) erkennt gesprochene deutsche Eingaben aus der Domäne Terminverhandlung, analysiert und übersetzt sie und äußert die englische Übersetzung. Verbmobil ist für die personenunabhängige Erkennung von Spontansprache konzipiert. Die gesprochene Eingabe wird über ein Mikrofon aufgenommen, digitalisiert und unter Berücksichtigung von Zeitdauer, Energie und Frequenz komprimiert. Anders als bei Diktiersystemen oder der Verarbeitung von gelesener Sprache muß das Spracherkennungsmodul von Verbmobil spontansprachliche Effekte wie Satzabbrüche, Räuspern und Niesen tolerieren. Die als möglich erkannten Wörter werden mit Wahrscheinlichkeiten bewertet und in einem Worthypothesengraphen dargestellt. Die Evaluierung der in Verbmobil integrierten Spracherkennung ergab eine Erkennungsrate von 73,3% bei einer Stichprobe von unbekanntem spontansprachlichen Terminverhandlungsdialogen.

Die Interpunktion wird in der gesprochenen Sprache durch Betonung und Phrasierung ersetzt. Nimmt man die Wortfolge „Ja-zur-Not-geht-es-auch-am-Samstag“, so kann sie entweder als Bestätigung des Termins „Samstag“ interpretiert werden (Ja, zur Not geht es auch am Samstag) oder als eingeschränkte Annahme (eines vorher besprochenen Termins) mit gleichzeitigem Gegenvorschlag (Ja, zur Not! Geht es auch am Samstag?). Die Integration der Satzmelodie durch das sogenannte Prosodiemodul (NIEMANN, 1997) unterscheidet 93% der rele-

vanten Phasengrenzen von Nichtgrenzen und reduziert so die syntaktischen Lesarten um 70%. Syntaktische und semantische Beschränkungen werden in Verbmobil verzahnt angewendet. Die Syntaxanalyse liefert Kategorie (Nomen, Pronomen, etc.) und grammatische Funktion (Subjekt, Objekt, etc.). Der Satz: „Es geht bei mir“, wird dann entweder als Bestätigung eines Termins oder als Bestätigung eines Ortes übersetzt. Auch verkürzte Fragen: „Bei ihnen oder bei mir?“, werden korrekt erkannt. In einem unzusammenhängend gesprochenen Text, wie z.B.: „Ja, ich weil also würde mal sagen, äh vorschlagen, wir könnten uns am äh 7. treffen, so im Mai.“ führt soeben beschriebene Tiefenanalyse nicht zum Ziel. Hier wird eine flache Verarbeitung durchgeführt, die im wesentlichen nur auf Grund des Datums und des Verbs „treffen“ übersetzt: „How about the seventh of may?“ Durch die Kombination von tiefer und flacher Verarbeitung ist das Übersetzungssystem sehr robust (BUB ET AL., 1997).

2.2 Autonome Systeme

Autonome Systeme sollen eigenständig in einer Ihnen unbekanntem Umgebung agieren können. Dazu benötigen sie ganz allgemein Kenntnisse über Raum, Zeit und Kräfte und müssen einfache Ursache-Wirkungs-Beziehungen beurteilen können. Unsicherheiten und Ungenauigkeiten der Umwelt bzw. der Erfassung derselben müssen erkannt und bewertet werden. Um ihr Ziel erreichen zu können, benötigen autonome Systeme robuste Planverfahren, die das Agieren möglichst schnell auf die über Sensoren erfaßte Umwelt abstimmen. Diese Sensoren stellen das 'Sehen' des Systems dar. Es wird im allgemeinen mit Videokameras und/oder Laserscannern realisiert. Die große Problematik dabei ist das „Bild-Verstehen“. Denn es gilt der zweidimensionalen Grauwertverteilung, die ein Bild letztendlich darstellt, Kenntnis über die Umwelt zu entnehmen. Dafür werden Bildverarbeitungsalgorithmen eingesetzt, die dann z.B. anhand der ersten und zweiten Ableitung an einem Punkt der Grauwertverteilung feststellen, daß sich in dem Bild eine Kante befindet. Desweiteren kann dann unter Einbeziehung von

Schattenwürfen festgestellt werden, ob es sich um eine vorspringende oder eine zurückweichende Kante handelt. Das Erkennen von bereits Bekanntem ist ebenso nicht trivial. So stellt die Wiedererkennung eines bekannten Gesichts ein echtes Problem dar, weil schon unterschiedliche Lichtverhältnisse die Grauwertverteilung stark variieren lassen.

Die Fortbewegungsart des Roboters wird seinem späteren Einsatzgebiet angepaßt. Auf glattem Untergrund wird bevorzugt ein fahrendes System eingesetzt, weil es keine Lastwechsel benötigt und energiesparend ist. In unwegsamem Gelände kann ein laufender Roboter sinnvoll sein. Hier wird bevorzugt mit insektenartigen Robotern experimentiert. Allgemein ist dieser Ansatz komplexer als der „rollende“, da das einzelne Bein zum Fortbewegen immer entlastet werden muß.

Anhand des Projektes AMOS (autonomie mobile Systeme) des FAW (Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung) in Ulm soll die Realisierung eines autonomen Systems beispielhaft dargestellt werden. Als Plattform wird ein industrielles fahrerloses Transportsystem verwendet, auf dem 2D- und 3D-Laserscanner, Videokameras, Ultraschallsensoren für die Umwelterfassung und Transputer, Signalprozessoren und ein Notebook für die Signalverarbeitung montiert sind. Die Steuerungshierarchie von AMOS (Schlegel/Illmann, 1995) enthält die Symbolische Ebene, in der der Plan der gesamten Handlung und das topologische Modell der Umwelt abgelegt sind. Darunter ist die sogenannte Subsymbolische Ebene, in der von einzelnen Modulen, wie z.B. dem Pfadplaner, der das Manövrieren an einer Stelle organisiert, Aufgaben durchgeführt und Nachrichten an andere Module und an die Symbolische Ebene verschickt werden. Die Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Module sind in einer Wissensbasis abgelegt, so daß schnelle Variationen möglich sind. Unter der Subsymbolischen Ebene könnte man noch die motorische, sensorische Ebene ansiedeln, auf die die Module zugreifen. Das Modul Bereichsüberwachung prüft, wo sich der Roboter bezüglich frei definierbarer Bereiche befindet. Es kann zum Beispiel auch den Winkel bestimmen, in dem der Roboter zu einer Wand steht. Tritt unverhofft ein Hindernis in den engeren Bereich der Bereichsüberwachung, so wird sofort das Signal

„Stoppen“ abgesetzt (auf Subsymbolischer Ebene) und an die Symbolische Ebene eine Nachricht gesendet. Das Modul SAF (Steer Angle Fields) ist für die Dreiradkinematik verantwortlich. Es berechnet die Bahnen (Lenkradeinschläge) der drei Räder unter Berücksichtigung eventueller Hindernisse. Ist keine Lenkradeinstellung für die Bewältigung der augenblicklichen Aufgabe zu finden, ergeht Meldung an die Symbolische Ebene. Dem Modul sind der Einfachheit halber verschiedene Strategien voreingestellt, wie „links halten“, „rechts halten“, „Gangmitte halten“, aber es kann auch auf unmittelbare Lenkradsteuerung reagieren. Das Modul Videosystem stellt seinerseits mehrere Betriebsmodi zur Verfügung: Es kann ein Objekt verfolgen, indem es immer den Objektschwerpunkt mit der Bildmitte abgleicht. Die Abweichungen können über den Justiertisch der Videokamera an das System weitergegeben werden. Das Videosystem kann auch Türschilder lesen und Objekte suchen. Aus diesen Modulen lassen sich nun Verhaltensmuster generieren, wie z.B. das Einparken im Fahrstuhl. Es wird mit den 3D- und 2D Laserscannern der Bereich bestimmt, der für das Rangiermanöver benötigt wird, dieser Bereich wird vom Modul Bereichsüberwachung überwacht. Es wird eine Einfahrgerade berechnet und das Modul SAF steuert die Lenkradeinstellungen zum Erreichen dieser Gerade bei. Die Ablaufsteuerung dieses Manövers liegt auf der Symbolischen Ebene.

Wird AMOS in eine ihm unbekannt Umgebung gebracht, so generiert es sich mit Hilfe seiner Laserscanner eine Karte dieser Umwelt (GUTMANN & SCHLEGEL, 1996; KNICK & SCHLEGEL, 1994; KNICK ET AL., 1994). Agiert AMOS in dieser Umgebung, so wird er seine neuen Sensordaten, die der (schnelle) 2D-Laserscanner generiert, immer mit dieser Karte abgleichen, er bildet sich aus dieser Karte also eine Art 'Erwartungshaltung'. Weichen die aktuellen Sensordaten zu sehr von dieser 'Erwartungshaltung' ab und spielt dieses Abweichen für das Erfüllen der momentanen Aufgabe eine Rolle, so kommt es zu einem Planzusammenbruch und es wird an der Stelle der Abweichung eine „Region of Interest“ (ROI) definiert, die sich der Roboter mit seinen Möglichkeiten nun genauer 'anschaut', was etwas mehr Zeit beansprucht. Das selbst ge-

nerierte Umweltmodell wird danach modifiziert und das Verfolgen der Aufgabe wieder aufgenommen. Wichtig ist dabei, daß der Roboter die Sensordaten speichert und sie in unterschiedliche Cluster einteilt (zum Beispiel nach Erfolg und Mißerfolg unterteilt). So kann er bei späteren Entscheidungen Situationen wiedererkennen und Schritte einleiten, die in ähnlicher Situation zum Erfolg geführt haben. Zum Beispiel müsse der Roboter zum Erfüllen der Aufgabe durch eine Tür hindurch fahren. Er fährt auf diese offene Tür zu. Tritt nun ein Mensch in diese Tür, zeigt der nächste Update dieser Umgebung, daß die Durchfahrt nicht frei ist. Es kommt zum Planzusammenbruch, weil das Durchfahren der Tür Teil der Aufgabe ist. Die ROI wird im Bereich der Tür definiert. Hat der Roboter früher schon einmal eine ähnliche Situation erlebt, so kann er eine Hypothese annehmen, die früher zum Erfolg geführt hat. Das würde bedeuten, daß das System aus Erfahrungen 'lernt'. Ein schönes Beispiel für dieses Lernen wäre das Umfahren eines Pflanzenkübels. Im Erdgeschoß des FAW befindet sich ein Pflanzenkübel mit einem Ficus, dessen Stamm in der Ebene des 2D-Laserscanners sehr dünn ist. Will der Roboter daran vorbeifahren, so kommt es zum Planzusammenbruch, weil er den dickeren Kübel nicht erwartet hat. Wird die Wahrnehmung des dünnen Stammes (an einer anderen Stelle, weil der Baum vielleicht verschoben wurde) in ein Cluster zugeordnet, das als Erfolgsrezept „weites Umfahren“ angibt, so hätte sich AMOS dieses Verhalten durch 'persönliche Erfahrung' selbst beigebracht.

2.3 Roboterarm und Roboterhand

Hohe Positioniergenauigkeit ist eine der Hauptanforderungen an Roboter-Manipulatoren. Während herkömmliche Industrieroboter versuchen, eine hohe relative Wiederholgenauigkeit einer Position durch hohe mechanische Steifigkeit, einhergehend mit großen Massen, zu realisieren, orientiert sich die andere Richtung der Forschung am menschlichen Arm. Das heißt, es wird ein vergleichsweise leichter Arm mit Multisensorik ausgerüstet, so daß Positionier- Ungenauigkeiten erkannt und kompensiert werden können. Weil Leichtbau auch für die Raumfahrt eine zentrale Forderung darstellt, verfolgt das Institut für Robotik und

Systemdynamik des DLR dieses Konzept (HIRZINGER, 1996a). Ganz allgemein sind von diesen Leichtbau-Robotern für die Raumfahrt auch Spin-Off-Effekte für Service-Roboter im häuslichen oder medizinischen Bereich zu erwarten, denn die (Schwer)-Mechanik der Industrieroboter ist dafür kaum geeignet. Im folgenden werden die Hardwarelösungen der Roboterhand und des Roboterarms des DLR vorgestellt. Die dazu gehörigen Steuerungskonzepte (besondere Bewegungen werden zum Beispiel über neuronale Netzwerke antrainiert (HIRZINGER, 1996b) werden hier nicht erörtert.

Bei dem Entwurf des nach Konzepten der Mechatronik (Integration von Maschinenbau, Elektronik und Computerleistung) entwickelten Roboterarms wurde darauf geachtet, daß alle Module im Gesamtsystem optimiert sind, wofür eine ganzheitliche Simulation angestrebt wird, die z.B. die Bewegung der Einzelteile und Nebeneffekte wie die Wärmeverteilung berücksichtigt. So konnte die komplette Steuer- und Leistungselektronik im Roboterarm integriert werden. Der Arm ist aus CFK-Gitterstrukturen aufgebaut und wird, analog zum menschlichen Arm, über Kräfte bzw. Momente an den Gelenken gesteuert. Durch hochdynamische Gleichstrommotoren in Verbindung mit kompakten Doppelplaneten-Getrieben konnte so ein 7-Gelenk-Roboterarm entwickelt werden, der ca. 14 kg schwer ist, eine Reichweite von 1,5 m hat und die Hälfte seines Eigengewichtes heben kann (letzteres entspricht einer Verbesserung um den Faktor 10 zu bisherigen Roboterarmen).

Ist die Umgebung eines Roboters für dessen Einsatz optimiert (zum Beispiel in einer Raumstation), so reicht ein 2-Backen-Greifer als Roboterhand aus. In Hinblick auf nicht vollständig planbare Reparaturen in der Raumfahrt und auf die Entwicklung von Service-Robotern ist es aber erstrebenswert, eine mehrfingerige, feingliedrige Roboterhand zu entwickeln. Durch die Entwicklung des künstlichen Muskels[®], ein hochkompaktes, lineares Antriebselement, ist es dem DLR gelungen, die Basis für Roboterhände zu legen, die die gesamte Antriebstechnik in der Hand bzw. in der Handwurzel integriert haben. Dennoch kann diese Hand Greifkräfte aufbringen, die es ihr erlauben ein Gewicht von 1,5 kg zu tragen. Die Hand ist mit dreigliedrigen Fingern ausgestattet,

in deren unterstem Glied ein künstlicher Muskel[®] eingebaut ist. Dieser Finger verfügt über 14 Sensoren inklusive einer kleinen Laserdiode in der Fingerkuppe, die der Handkamera die Ortung von zu greifenden Objekten erleichtert. Realisiert wurde bereits eine dreifingrige Hand, angestrebt ist eine vierfingrige anthropomorphe Hand mit 12 integrierten Antrieben (ein Prototyp mit vier Gelenken⁷, drei Freiheitsgraden und 25 Sensoren pro Finger existiert bereits). Mit ihr kann man nicht präparierte Objekte manipulieren und sie könnte zu einer Prothese weiterentwickelt werden⁸.

2.4 Spotlights

In diesem Abschnitt sollen schlagwortartig einige Projekte vorgestellt werden, die die Mannigfaltigkeit der Robotik-Forschung belegen. Die letzten drei Beispiele zeigen bereits kommerziell hergestellte Service-Roboter.

‘Lebender Roboter’

Japanische Forscher der Universitäten Tokio und Tsukuba haben einer Küchenschabe einen winzigen elektronischen Schaltkreis implantiert. Mit elektrischen Impulsen konnten sie dann die Bewegungsrichtung der Küchenschabe bestimmen (Bild der Wissenschaft 4/1997; S. 9).

Intelligente Straßen

Das National Automated Highway System Consortium (NAHSC) in den USA hat ein Konzept entwickelt, mit dem man relativ preiswert die Kapazität der Highways verdoppeln bis verdreifachen kann. Dafür werden alle 1,2 m kleine Nägel mit Magneten in die Fahrbahn getrieben, die als Informationsträger dienen. Abgelesen wird die Information mit Sensoren unter der Stoßstange der Kfz, die zusätzlich mit Radar,

⁷ Das kardanische Fingergrundgelenk kann als Einheit zweier Einzelgelenke betrachtet werden.

⁸ Vgl. hierzu die Überlegungen zur Prothetik in Abschnitt 3.

Laserabstandsmessung oder Videokameras ausgerüstet sind. Nebeneffekt: Durch den Kolonnenabstand von vier Metern wird der Luftwiderstand reduziert, wodurch der Spritverbrauch um 30% sinkt (Wirtschaftswoche **22** / 22.5.1997; S. 92).

Mienenspielerkennung

Am Massachusetts Institute of Technology (MIT) wurde ein Programm entwickelt, das das Mienenspiel, welches mit einer Videokamera aufgenommen wurde, analysiert. Das Programm vergleicht dabei mit Mustern, die Schauspieler dem Computer antrainiert haben. Laut Professor Essan hat das System eine Treffsicherheit von 98%, ist allerdings noch zu langsam für spontane Gefühlsäußerungen (Wirtschaftswoche **10** / 27.2.1997; S. 103).

Elektromechanische Grille

Dr. Barbara Webb implementierte in einen selbstfahrenden Kleinroboter das Verhalten, nach dem Grillenweibchen männliche Artgenossen anhand deren Gesangs ausfindig machen. Diese einfachen Regelmechanismen ergaben bereits ein komplex erscheinendes Verhalten. Es handelt sich also um einen mobilen Automat der sich durch akustische Signale steuern läßt (Spektrum der Wissenschaft **5**/1997; S. 78-83).

Minimalinvasive Operation

Bei einer endoskopisch durchgeführten Operation führt ein Operateur die Kamera und ein anderer operiert nach den Bildern, die die Kamera auf den Monitor überträgt. Damit sind zwei Probleme verbunden, zum einen muß die Steuerung der Kameraführung verbal zwischen den Operateuren erfolgen („weiter links“, „stop“, „zurück“ etc.) und zum zweiten ermüdet der „Kameramann“; das Bild beginnt zu wackeln. Ein Kamera-Roboter, der vom Institut für Robotik und Systemdynamik des DLR entwickelt wurde, ist in der Lage den Part des Kameramanns zu

übernehmen. Er verfolgt mit einer sogenannten Tracking-Methode einen Farbpunkt auf dem Instrument des Operateurs. Der Roboter richtet die Kamera so aus, daß dieser Farbpunkt immer in der Mitte des Bildes erscheint (HIRZINGER, 1996b).

Roboter im Schuhlager

In einem Stuttgarter Kaufhaus agiert im Schuhlager ein Dienstleistungsroboter. Per Handterminal kommunizieren der Steuerrechner und der Verkäufer. Das gewünschte Schuhmodell in der richtigen Größe und Farbe wird dann vom Roboter aus dem Lager herausgesucht. Konstruiert wurde der Roboter von der Firma Reis Robotics (VDI-Nachrichten **21** / 23.5.1997; S.3).

Putzroboter

Ein Glaskuppeldach der Leipziger Messe GmbH wird von zwei Fensterputzrobotern gereinigt. Sie lassen sich an Seilen an den Scheiben herab und putzen mit rotierenden, sensorgesteuerten Bürsten. Laut Angaben der Entwickler (Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, Magdeburg) beginnt die Wirtschaftlichkeit bei einer Glasfläche von 10.000 Quadratmetern (Wirtschaftswoche **19** / 1.5.1997; S. 88).

Automatische Eßhilfe

Die Firma Rehab Robotics Ltd. hat eine automatische Eßhilfe für behinderte Menschen entwickelt. Es handelt sich um einen Fütterungsautomaten, der körperlich Behinderten die Essensaufnahme ohne fremde Hilfe ermöglicht, was einen Gewinn an Unabhängigkeit darstellt. Grundlage ist ein mit Schwachstrom betriebener, sich langsam bewegendes Roboterarm mit vergleichsweise geringer Reichweite (Sicherheit), der mit Berührungsmotoren ausgerüstet ist, die auf physischen Widerstand reagieren (Prospekt der Firma REHAB Robotics Ltd.).

3 Ersetzbarkeit des Menschen

Der Einsatz von Robotern als Agenten ist nur in Interaktion mit dem Menschen zweckmäßig, denn der Roboter wird vom Menschen zum Erreichen seiner Ziele eingesetzt. Im Gesamtsystem Mensch/Maschine kommt daher der Form der Schnittstelle Mensch/Maschine und ihrer Position innerhalb der Steuerungshierarchie des Roboters eine besondere Bedeutung zu. Im ersten Teil dieses Kapitels werden verschiedene Formen dieser Schnittstelle von seiten der Maschine betrachtet. Im zweiten Teil werden dagegen die Positionen des Menschen innerhalb des Gesamtsystems untersucht. Im dritten Teil werden dann verschiedene Kriterien der Ersetzbarkeit des Menschen entwickelt, die im vierten Teil kritisch diskutiert werden.

3.1 Formen der Schnittstelle Mensch/Maschine

Die Schnittstelle Mensch/Maschine kann auf unterschiedlichste Art und Weise realisiert werden. Als klassische Form können Tastatur und Bildschirm bezeichnet werden. An öffentlichen Terminals ist es auch schon üblich, nur über den Bildschirm zu kommunizieren, indem der Benutzer verschiedene Möglichkeiten durch Berühren der Scheibe auswählt. Am Institut für Robotik und Systemdynamik des DLR befaßt man sich mit der Fernsteuerung von Robotern, die sich weit entfernt, z.B. im Weltraum, befinden. Bei dieser „Tele-Sensorprogrammierung“ (HIRZINGER ET. AL., 1996c), die hier als Beispiel für die hierarchische Struktur einer Robotersteuerung dienen soll, wird dem Roboter in einer virtuellen Umgebung „gezeigt“, was er tun soll. Die Schnittstelle erlaubt das schnelle Umschalten zwischen on-line-Fernsteuerung und Fernprogrammierung (hier wird off-line in der Bodenstation eine neue Handlungsfolge programmiert, die dann komplett als „Task“ übermittelt und vom Roboter ausgeführt wird).

Die Robotersteuerung ist dabei auf einer hierarchischen 2-in-2-Schichten-Struktur realisiert. Die unterste Ausführungsebene ist die Sensorphase, sie kennzeichnet das intelligente autonome Verhalten des Robo-

ters aufgrund der Auswertung seiner eigenen Sensordaten. Wenn nicht alle Freiheitsgrade durch diese Sensorik geregelt werden können, so übernimmt die zweite Schicht die Belegung dieser Freiheitsgrade entweder durch den Operateur (Telemanipulation) oder durch einen übergeordneten Bahnplaner. Auf dieser Ebene sind auch Elementaroperationen abgelegt, und die Semiautonomie der untersten Ebene wird z.B. um Greiferoperationen ergänzt. Darüber ist die Operationsebene angeordnet, die die eigentliche Mensch/Maschine-Schnittstelle darstellt. Mittels eines 3D-Cursors, der sogenannten „Space Mouse“ (HIRZINGER ET AL., 1996a), kann der Experimentator, der kein Robotikexperte mehr sein muß, Objekte auswählen, die in der Raumstation bewegt werden sollen und per „Mouse Click“ die durchzuführende Ortsoperation auswählen. Der aktuelle Status des Systems wird dabei stets zurückgemeldet. Die konsistente Folge von Operationen innerhalb einer solchen komplexen Ortsoperation ist auf der höchsten Hierarchieebene als ein „Task“ spezifiziert. Sollte während eines Weltraumeinsatzes (z.B. bei einer vom Roboter durchgeführten Reparatur) unvorhergesehene Operationen nötig werden, so können diese off-line per „Space Mouse“ programmiert und in der Simulation getestet werden, und schließlich als Task der obersten Ebene implementiert werden.

Eine andere interessante Schnittstelle wurde von der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) entwickelt (KRÜGER ET AL., 1995). Mittels einer sogenannten Shutter-Brille kann der Benutzer ein durch Stereoprojektion erzeugtes 3D-Bild sehen. Dieses Bild kann gedreht, gekippt und vergrößert werden. Von der Daimler-Benz AG wurde diese Schnittstelle weiterentwickelt. Hier ist es möglich, am virtuellen Fahrzeugprototyp Bauteile zu entfernen und Strömungsverhältnisse darzustellen. Ziel ist es, die gesamte Konstruktion an diesem 3D-Simulationsprüfstand durchzuführen, wovon man sich eine erhebliche Verkürzung der Entwicklungszeit erhofft.

Die bis hierher beschriebenen Schnittstellen sind im wesentlichen Weiterentwicklungen der klassischen Computer-Schnittstelle Tastatur und Monitor: Von seiten der Maschine werden Signale gesendet, die der Mensch über seine Sinnesorgane wahrnimmt und auf die er seinerseits

durch Manipulation reagiert. Die Manipulation findet dabei bereits wieder in der Domäne der Maschine statt, indem man z.B. etwas mit einem Pointer anklickt. In den beiden folgenden Beispielen dagegen wird die Maschine direkt an das Nervensystem des Menschen angeschlossen. Wahrnehmung über die „äußeren“ Sinnesorgane und Manipulation entfallen.

Forschern des Max-Planck-Instituts für Biochemie in München ist es gelungen, einen Siliziumchip und eine Nervenzelle (Neuron) so zu verbinden, daß sie Signale austauschen können (FROMHERZ ET AL., 1997). D.h. es konnten sowohl die von der Zelle ausgehenden Impulse gemessen werden, als auch Signale auf die Nervenzelle übertragen werden, was durch auf dem Chip integrierte Schaltkreise gelang. Diese Forschungsergebnisse können, allerdings in fernerer Zukunft, für neuronale Computer oder für Prothesen eingesetzt werden. Letztere könnten an das menschliche Nervensystem angeschlossen werden und so die vom Gehirn an das nicht mehr vorhandene Körperglied gerichteten Impulse in entsprechende Bewegungen der Prothese umwandeln. Eine andere Möglichkeit Prothesen über Nervensignale anzusteuern, wird im INTER-Projekt (Intelligent Neural Interface) von (BOGDAN & ROSENSTIEL, 1996) verfolgt. Sie durchtrennen periphere Nervenbahnen und lassen diese wieder zusammenwachsen, wobei die einzelnen Nervenfasern (Axone) dann allerdings durch einen mit Löchern versehenen Siliziumchip wachsen. An diesen Löchern sind Elektroden angebracht, über die die Nervensignale, die durch das Axon gesendet werden, detektiert werden können. Über ein künstliches neuronales Netz werden die verschiedenen Nervensignale klassifiziert und dann zur Ansteuerung einer Prothese verwendet⁹.

Die bedienerfreundlichste Schnittstelle wäre sicherlich die natürlichsprachige, d.h. man sagt dem Computer/Roboter, was er tun soll. Hier werden von seiten der Maschine „klassisch“ Signale ausgesendet, die der Mensch über seine „äußeren“ Sinnesorgane wahrnimmt, die Reaktion darauf erfolgt aber in der Domäne des Menschen, nämlich in natür-

⁹ Dabei sollte das Ziel, die effektive Ansteuerung einer Prothese, nur nach Leistungskriterien beurteilt werden. Der hier angestrebte Nachbau der natürlichen Ansteuerung über Nerven soll nicht übervorteilt werden.

licher Sprache. Die damit verbundene Problematik des Sprachverstehens ist im vorigen Abschnitt diskutiert worden. Die optimale Form der Mensch/Maschine-Schnittstelle ist selbstverständlich von der konkreten Anwendung, von der Physiologie des Menschen und auch von den Kosten abhängig, dennoch stellt sich die Frage, ob es nicht allgemeine Kriterien gibt, die in die individuelle Optimierung einfließen könnten.

Mindestens ebenso wichtig wie die Form der optimalen Schnittstelle Mensch/Maschine ist ihre Einbettung in die Steuerungshierarchie der Maschine (vgl. obiges Beispiel der „Tele-Sensorprogrammierung), bzw. als Frage formuliert: Welche Position gibt sich der Mensch innerhalb der Hierarchie der Schnittstelle? Soll die letzte Entscheidungsgewalt immer beim Menschen bleiben? Beobachtet man die Forschung der Automobilindustrie in Sachen Autopilot, so wird dort diese Frage mit ja beantwortet. Ein an der Bundeswehrhochschule München entwickeltes Bildverarbeitungssystem erlaubte die vollautomatische Fahrt von München ins dänische Odense (1700 km), wobei der Fahrer nur in schwierigen Situationen (z.B. Baustellen) eingreifen mußte¹⁰. Neben diesen vollautomatischen Entwicklungen werden auch Assistenzsysteme entwickelt, die z.B. den Gaspedalwiderstand erhöhen, wenn der Sicherheitsabstand zum Vordermann zu gering ist. Schon hier stellt sich die Frage, ob das System den Autofahrer nicht aktiv zu seiner eigenen Sicherheit „zwingen“ sollte. Noch konkreter wird die Frage nach der „letzten Instanz“, wenn man Autopiloten in Flugzeugen betrachtet. So gilt es als unstrittig, daß viele Flugzeugunglücke ihren Anfang an der Schnittstelle Mensch/Maschine genommen haben (siehe Bild der Wissenschaft 5/97; S.67-69). Soll der Autopilot einen vom Piloten gegebenen Befehl mißachten, wenn dieser keinen flugtechnischen Sinn ergibt, weil er z.B. in einer besonderen Streßsituation gegeben wurde? Es soll an dieser Stelle betont werden, daß nicht der menschliche Pilot allein als Sicherheitsrisiko gilt (es gibt keine Statistik, in der erfaßt wurde, wie oft hochqualifizierte Piloten einen Unfall bei versagender Technik verhindert haben), denn es gab auch Szenarien, in denen es dem Pilo-

¹⁰ Hierzu wurde er durch das System aufgefordert. Unter Umständen ist der Fahrer von der Situation sogar überfordert (vgl. Autopilot im Flugzeug).

ten nicht mehr möglich war, in die defekte automatische Steuerung einzugreifen. Ähnliche Fragestellungen werden bei der Programmierung von autonomen Service-Robotern auftreten. Sicherlich wird man die Steuerung sich frei bewegender Roboter eher defensiv auslegen, aber es stellt sich die Frage, ob jeder vorbeilaufende Mensch einen solchen Roboter zum Stillstand bringen können muß. Überträgt man gedanklich diese Konstellation auf einen Fensterputz-Roboter in einem Wohn-/Kaufhaus, so kann man sich den Spaß der Kinder an dem immer wieder durch z.B. Rufen gestoppten Roboter lebhaft vorstellen.

3.2 Formen der Position des Menschen innerhalb des Systems

Die bisher betrachteten Überlegungen zur Schnittstelle Mensch/Maschine berücksichtigten mit der Form der „Schnittstelle“ und der Frage nach der optimalen Position derselben innerhalb der Steuerungshierarchie des Roboters die maschinelle Seite der Fragestellung. Umgekehrt kann man auch nach der Position des Menschen innerhalb des Gesamtsystems Mensch/Maschine fragen. Betrachtet man die Prothetik, so ist die Maschine als Hilfsmittel für den Menschen anzusehen. Setzt man den „gesunden Menschen“¹¹ als zu erreichendes Ziel, so ergänzt die Prothese den körperlich Behinderten in der Art, daß sie ihn diesem Ziel ein Stück näher bringt. Beobachtet man die Fortschritte in der Mechatronik, so muß allerdings auch diese Zielangabe hinterfragt werden, denn es gibt keinen Grund *nur* das Ziel „gesunder Mensch“ anzustreben. Die Gliedmaßen des Menschen sind als „Universalwerkzeuge“ in allen Lebenslagen einsetzbar. Schon heute werden Armprothesen mit einem Handmodell ausgestattet, das durch einen hautähnlichen Überzug kosmetisch optimiert ist, und mit einem zweiten Greifer, den der behinderte Mensch für gröbere Arbeiten statt dessen auf die Prothese aufsteckt. Diese modulare Spezialisierung könnte noch weiter getrieben, die Prothese für einen konkreten Einsatzbereich optimiert werden.

¹¹ Das Ziel „gesunder Mensch“ ist seinerseits zu definieren. Grundlage könnten Standardleistungen menschlicher Organe oder menschlicher Handlungsmöglichkeiten sein, wobei die Festlegung derselben ihrerseits problematisch ist.

Beispielsweise könnte für einen Feinmechaniker eine Prothese mit zwei Greifern interessant sein oder ein weiteres Gelenk in der Mitte des „Unterarms“. Stellt die Arbeit andere Anforderungen, so wird die Prothese gewechselt. Das System Mensch/Maschine leistet in diesen Situationen dann mehr als der „gesunde Mensch“.

Betrachtet man die Position des Piloten innerhalb des Systems Pilot/Autopilot, so kommen dem Menschen fast ausschließlich Überwachungsaufgaben bezüglich der Arbeit der Maschine zu, technisch ist es bereits möglich, ganz ohne menschlichen Pilot ein Flugzeug zu steuern (siehe Bild der Wissenschaft 5/97; S.59). Die Leistung, die früher der menschliche Pilot erbrachte, wird nun von dem Autopiloten übernommen. Analog ist der Sachverhalt bei der minimalinvasiven Operation (vgl. Abschnitt 2.4). Hier wird die Leistung „Kamera führen“ von einem Roboter statt von einem Assistenzarzt erbracht.

Anders verhält es sich mit dem System Mensch/Maschine im Büro. Datenbanksysteme ersetzen die Karteikartensammlung, das „Nachschlagen“ wird von einem Suchalgorithmus schneller und zuverlässiger durchgeführt, Qualität und Quantität der vollbrachten Arbeit steigen. Betrachtet man die Möglichkeiten, die das Internet als weltweiter Datenspeicher bietet, so muß man davon ausgehen, daß ein Mensch diese Datenmengen nicht mehr „per Hand“ bewältigen kann. Sie werden letztendlich nur durch computergestützte Suchalgorithmen nutzbar. Würde man versuchen, die Stellung des Menschen innerhalb dieses Systems Mensch/Maschine zu bewerten, so wird der Mensch über seine Fähigkeiten hinaus ergänzt. Es ist ihm nur dann möglich, eine Aufgabe zu erfüllen, wenn er die Maschine einsetzt.

Zusammenfassend kann man drei verschiedene Positionen des Menschen innerhalb des Systems Mensch/Maschine beschreiben, wenn man den „gesunden Menschen“ als Maßstab nimmt:

1. *Restitutionsleistungen.* Hier wird es einem körperlich oder geistig behinderten Menschen durch die Maschine möglich, die zu definierenden Standardleistungen eines Men-

schen zu erbringen bzw. ihnen näher zu kommen. Beispiele sind Prothesen als Ersatz für Extremitäten aber auch Retina- oder Cochlea-Implantate.

2. *Substitutionsleistungen.* Die Leistung, die bisher von einem Menschen erbracht wurde, wird nun von der Maschine erbracht, wobei sie von Menschen überwacht wird. Beispiel ist hier der Autopilot im Flugzeug aber auch der Roboter am Fertigungsfließband.
3. *Expansionsleistungen.* Hier erreicht der Mensch in Interaktion mit der Maschine höhere Leistungsstufen als die Standardleistungen. Beispiel ist hier die Suchmaschine, die es ermöglicht, große Datenspeicher zu durchsuchen, bzw. die Datenbanksysteme selbst, die die Datenverwaltung und -organisation extrem vereinfachen.

3.3 Typen der Nicht-Ersetzbarkeit

Stellt man die Frage nach der Ersetzbarkeit des Menschen, so müßte prinzipiell in jedem Forschungsbereich, der sich mit künstlichen Agenten befaßt, geprüft werden, ob die Anwendung dieses Agenten dazu geeignet wäre, den Menschen bei derselben Anwendung zu ersetzen. In einigen Bereichen ist diese Ersetzung besonders sinnvoll¹², nämlich dann, wenn die äußeren Umstände für Menschen gefährlich bzw. gesundheitsschädlich sind. Beispiele hierfür sind Roboter im Weltraum, im Steinkohleabbau oder in Kernkraftwerken. Die vollständige Prüfung aller Forschungsbereiche wäre mit enormem Forschungsaufwand und sehr detaillierten Betrachtungen verbunden. Es scheint daher sinnvoller, die negierte Frage zu stellen: In welchen Bereichen soll der Mensch als Agent nicht ersetzt werden? Die Antwort auf diese Frage kann man als eine Art Grenze verstehen, innerhalb derer alle Forschungsvorhaben als interessant und damit als durchzuführen beurteilt werden, außerhalb

¹² Diese Bereiche sollten in einer Studie auch gekennzeichnet werden, z.B. durch die Angabe von Kriterien.

derer im Gegensatz dazu aber keine aufwendigen Forschungen betrieben werden sollen. Diese Grenze könnte etwa als ein Kriterium für die Vergabe von Forschungsmitteln herangezogen werden.

Nach welchen Kriterien soll die Nicht-Ersetzbarkeit beurteilt werden? Im Anschluß an den vorigen Abschnitt gilt es, nach der *technischen* Nicht-Ersetzbarkeit zu fragen. Ist der Roboter in der Lage, den Menschen technisch zu ersetzen, erbringt er die erwünschte Leistung in gleicher Qualität? Es ist offensichtlich, daß die Antwort sich auf den momentanen Stand des Wissens bezieht, denn mit dem technischen Fortschritt wird sich auch die Antwort ändern. Ein zweites Kriterium könnte die *ökonomische* Nicht-Ersetzbarkeit sein. Es ist unter Umständen einfach billiger, eine bestimmte Leistung von einem Menschen erbringen zu lassen. Beispielsweise liegt die Grenze der Wirtschaftlichkeit bei dem Fenster-Putzroboter aus Abschnitt 2.4 bei einer Fensterfläche von 10.000 m². Für kleinere Fensterflächen wird man weiterhin natürliche Fensterputzer einsetzen. Da sich die Wirtschaftlichkeit der Roboter mit der Zeit verbessert, muß auch diese Frage wiederholt gestellt werden¹³.

Bisher wurde der Begriff „ersetzbar“ deskriptiv gelesen, es wurde also danach gefragt, ob der Mensch durch eine Maschine ersetzt werden kann. „Ersetzbar“ kann aber auch präskriptiv gelesen werden, im Sinne von *darf* man den Ersatz des Menschen durch eine Maschine zulassen. Daran schließt sich die Frage an, ob man den Menschen ersetzen *will* oder gar *soll*. Eine dritte Kategorie wäre die *rechtliche* Nicht-Ersetzbarkeit. Hier wird untersucht, ob eine Ersetzung innerhalb des bestehenden Rechts möglich wäre oder ob eine Gesetzesänderung angestrebt werden sollte. Das bezieht auch Haftungsfragen bei fehlerhaftem Verhalten der Maschine ein. Wenn kein Verantwortlicher genannt werden kann (z.B. Hersteller oder Besitzer des Agenten), würde der Ersatz untersagt. Ein viertes Kriterium stellt die *moralische* Nicht-Ersetzbarkeit dar. Es könnte z.B. ein Roboter zur Debatte stehen, der die Erzie-

¹³ Nach der Realisierung eines Prototyps wird kostengünstige Produktion zum „Unter-Zweck“ technischen Handelns.

hung der Kinder übernehmen kann. Er hat viel Zeit, hat neueste Erziehungsmethoden implementiert, ist geduldig und im Vergleich zu einem natürlichen Betreuer preiswert. Ist ein Erziehungsroboter moralisch vertretbar?

Entscheidend für die Wahl der hier beschriebenen Kriterien ist, daß sie für die erwünschte Strukturierung des Problems zweckmäßig ist. Das soll anhand der folgenden Beispiele gezeigt werden. Beim Autopiloten ist aus technischer Sicht die Ersetzung des Menschen bereits möglich. Aus ökonomischer Sicht gilt es abzuwägen, denn ein für den Alleinflug modifizierter Autopilot ist teuer. Der rechtliche Standpunkt wird im wesentlichen die Fragen der Haftung bei Versagen des Systems untersuchen. Gegen wen können Ansprüche erhoben werden? Die moralische Nicht-Ersetzbarkeit steht in diesem Zusammenhang nicht im Vordergrund. Ein anderes Beispiel ist die automatische, kodierte Unterschrift. Sie steht an der Schwelle zur technischen Realisierbarkeit und ist ökonomisch sehr sinnvoll, da sie manche Reise erspart. Rechtlich ist zunächst die Frage nach der Sicherheit der Kodierung zu klären, darüber hinaus kann man die Frage stellen, ob es dann nicht zwei Kategorien von Verträgen/Urkunden geben sollte. Denn ab einer gewissen Geldsumme, die im Vergleich den Reisepreis als „Peanuts“ erscheinen läßt, oder bei einer besonderen Urkunde (z.B. Heiratsurkunde) könnte man weiterhin nur die echte Unterschrift als rechtens erklären. Analog zu dem letzten Gedanken würde man auch das Kriterium der Moral anwenden: Ist unter einer Sterbeurkunde eine nicht handschriftliche Unterschrift moralisch vertretbar? Als letztes Beispiel soll eine über noch vorhandene Nervensignale gesteuerte Armprothese betrachtet werden. Sie befindet sich im technischen Entwicklungsstadium. Aus ökonomischen Gesichtspunkten ist die Armprothese sehr sinnvoll, denn durch die oben beschriebenen „modularen Vorteile“ kann der körperlich Behinderte spezielle Tätigkeiten durchführen, für die „gesunde Menschen“ Hilfsmittel benötigen. Der Status der Behinderten würde sich vom staatlich vorgeschriebenen Mitarbeiter (geregelt über Quoten) zum gefragten Spezialisten ändern. Vom rechtlichen Standpunkt wären in diesem Zusammenhang z.B. die Fragen des Arbeitsrechts zu berück-

sichtigen. Aus moralischen Gesichtspunkten wäre zu untersuchen, ob der behinderte Mensch in dieser Konstellation nicht ausschließlich zum Mittel innerhalb des Arbeitsprozesses degradiert wird.

Zusammenfassend wurden folgende Kategorien der Nicht-Ersetzbarkeit des Menschen vorgeschlagen:

1. Technische Nicht-Ersetzbarkeit
2. Ökonomische Nicht-Ersetzbarkeit
3. Rechtliche Nicht-Ersetzbarkeit
4. Moralische Nicht-Ersetzbarkeit

3.4 Diskussion

Berücksichtigt man die vorgeschlagenen Einteilungen aus den beiden letzten Abschnitten, so kommt man zu einer zweidimensionalen Struktur. Die Fallbeispiele werden bezüglich der Position des Menschen innerhalb des Gesamtsystems, bezogen auf den „gesunden Menschen“, kategorisiert und dann nach den Kriterien der Nicht-Ersetzbarkeit beurteilt. Die Beispiele am Ende des vorigen Abschnittes sind daher aus den verschiedenen Leistungsbereichen ausgewählt worden. Auf Grundlage dieser Struktur läßt sich sicherlich bereits eine Diskussion begleiten, indem man jeweils das Feld bestimmen kann, bezüglich dessen Inhaltes man diskutiert. Die Beispiele zeigen aber auch, daß diese Einteilung nicht immer eindeutig ist. Während der Autopilot als Substitutionsleistung und die codierte Unterschrift als Expansionsleistung betrachtet werden können, ist bei der Prothese sowohl eine Restitutionsleistung als auch eine Expansionsleistung zu erkennen, denn mit einem Greifer kann man eben Dinge greifen, die der menschlichen Hand z.B. zu heiß oder zu groß sind. Auch bei den Kategorien quer zu dieser Struktur lassen sich noch zusätzliche Fragestellungen finden. Es wäre z.B. interessant wie sich die gesellschaftliche Stellung des behinderten Menschen ändert, dadurch daß er für seinen Arbeitgeber nun ein wertvoller Spezialist geworden ist, während er bisher seine Anstellung zu einem gewissen Anteil der gesetzlichen Regelung zu verdanken hatte.

Die in den letzten beiden Abschnitten skizzierte Struktur sollte daher zunächst nur als eine mögliche Gliederung betrachtet werden, die bei der Behandlung konkreter Fallbeispiele sicherlich variiert werden sollte.

Die Beurteilung der ökonomischen, rechtlichen und moralischen Nicht-Ersetzbarkeit benötigt Experten aus eben diesen Disziplinen. Da hierbei auch Fachfremde über Belange der Robotik (deren Experten die technische Nicht-Ersetzbarkeit beurteilen) und der Künstlichen Intelligenz reden können sollen, ist es wichtig einige Begriffe, die in diesen Disziplinen „Alltagssprache“ sind, genauer zu bestimmen. Auffällig häufig werden in der Robotik epistemische Ausdrücke wie „Erkennen“ und „Wissen“ verwendet, die dann einem Roboter zugesprochen werden. Hierbei wird von einer Vorstellung des Erkennens bzw. des Wissens beim Menschen ausgegangen, die zunächst in ihrer Geltung und dann in Bezug auf Ihre Übertragbarkeit auf den Roboter überprüft werden müssen. Analog verhält es sich mit der intentionalen Rede „der Roboter will ...“, „der Roboter versucht ...“ und mit evolutiver Rede „der Roboter entwickelt sich weiter“. Die Verwendung dieser anthropomorphen Sprache ist in der KI-/Robotik-Community üblich, ohne darauf hinzuweisen, daß es sich um Modelle z.B. des Erkenntnisprozesses des Menschen handelt oder um ein Modell der Evolution. Begriffe über die in der „KI-Community“ kein Einverständnis besteht, werden ihrerseits von KI-Forschern diskutiert. So verfolgt Luc Steels z.B. die Fragen, wann ein Roboter als autonomer intelligenter Agent bezeichnet werden kann und liefert dabei eine mögliche Unterscheidung von Automatik und Autonomie in diesem Kontext und einen Vorschlag wie Intelligenz entstehen kann (STEELS, 1995; STEELS, 1996b). Diese Arbeiten könnten als technische Grundlage bei einer Begriffsdefinition berücksichtigt werden.

Literatur

ACKERMANN, J. & HIRZINGER, G. (1996): Institute for Robotics and System Dynamics. IEEE Robotics & Automation Magazine, 47.

BLOCK, H.U. (1997): The Language Components in Verbmobil. IEEE, 79-82.

BOGDAN, M., ROSENSTIEL, W. (1994): Artificial Neural Nets for Peripheral Nervous System - Remoted Limb Protheses. Proceedings of NeuroNimes '94, Marseille, 193-202.

BOGDAN, M., ROSENSTIEL, W. (1996): Classification of Nerve Signals using Kohonen's Self-Organizing Map, First International Conference on Bioelectromagnetism, Tampere (Finland), 239-240.

BOGDAN, M., ROSENSTIEL, W. (1996): Intelligent Neural Interface - Signalprocessing of Nerve Signals using Artificial Neural Nets. BioNet'96 (Invited paper), Berlin, 33-38.

BROCKHAUS (1992): Enzyklopädie, Band 18, Mannheim.

BRUNAK, S., LAUTRUP, B. (1993): Neuronale Netze: Die nächste Computer-Revolution. München.

BUB, T., WAHLSTER, W., WAIBEL, A. (1997): Verbmobil: The Combination of Deep and Shallow Processing for Spontaneous Speech Translation. Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, München (ICASSP 97) 1: 71-74.

DENGEL, A. (1994): Künstliche Intelligenz. Allgemeine Prinzipien und Modelle. Mannheim.

FROMHERZ, P. (1997): Two-Way Silicon-Neuron Interface by Electrical Induction, Phys. Rev. E55: 1779-1782

GUTMANN, J.-S., SCHLEGEL, C. (1996): AMOS: Comparison of Scan Matching Approaches for Self-Localization in Indoor Environments. Eurobot '96.

HIRZINGER, G. (1996a): Leichtbau, Geschicklichkeit und multisensorielle Autonomie. Proceedings AMS '96, 12. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme, München.

HIRZINGER, G. (1996b): Mechatronik, 3D-Grafik und Telepräsenz - Neue Anstöße für Maschinenbau, Robotik und Medizintechnik. VDI-Bericht 1270, 3.

HIRZINGER, G., GOMBERT, B., DIETRICH, J., SENFT, V. (1996a): Die SPACE MOUSE. Eine neue 3D-Mensch-Maschine-Schnittstelle als Spin-off-Produkt der Raumfahrt. In: Prenzel, W.-D. (Hg.) Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Berlin.

HIRZINGER, G., KOEPPE, R., BAADER, A., LANGE, F., RALLI, E., ALBUSCHÄFER, A., STAUDTE, R., WIE, W.-Q. (1996b): Neural Perception and Manipulation in Robotics. Statusseminar des BMBF „Neuroinformatik und Künstliche Intelligenz“, München.

HIRZINGER, G., LANDZETTEL, K., BRUNNER, B., STEINMETZ, B.M. (1996c): Steuerungskonzepte für internes und externes Roboter-Servicing in der Raumfahrt. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongreß, Dresden.

KINNEBROCK, W. (1996): Künstliches Leben. Anspruch und Wirklichkeit. München.

KNICK, M., SCHLEGEL, C., ILLMANN, J. (1994): AMOS: Selbständige Generierung bedeutsamer Wahrnehmungsklassen durch ein autonomes System. In: Levi, Bräunl (Hgg.) Autonome Mobile Systeme. AMS '94, 10. Fachgespräch, Berlin.

KNICK, M., SCHLEGEL, C.: AMOS(1994): Active Perception of an Autonomous System. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 94), München, 281.

KRÜGER, W., BOHN, C.-A., FRÖHLICH, B., SCHÜTH, H. STRAUSS, W., WESCHE, G. (1995): The Responsive Workbench: A Virtual Work Environment. IEEE 7, 42-48.

MAZZETTI, A. (1992): Praktische Einführung in Neuronale Netze. Hannover.

NIEMANN, H., NÖTH, E., KIEBLING, A. KOMPE, R., BATLINER, A. (1997): Prosodic Processing and its Use in Verbmobil, IEEE, 75-78.

RITTER, H., MARTINETZ, T., SCHULTEN, K. (1991): Neuronale Netze. Bonn

SCHLEGEL, C., ILLMANN, J. (1995): AMOS: Beherrschung vielfältiger Anforderungen durch dynamische Kombination und Konfiguration einfacher Mechanismen. In: Dillmann, Rembold, Lüth (Hgg.) Autonome Mobile Systeme. AMS 95, Berlin.

STEELS, L. (1995): When are robots intelligent autonomous agents? Journal of Robotics and Autonomous Systems 15, 3-9.

STEELS, L. (1996a): Homo cyber-sapiens oder Robo hominidus intelligens: Maschinen erwachen zu künstlichem Leben. In: Maar, Pöppel, Christaller (Hgg.) Die Technik auf dem Weg zur Seele. Reinbek.

STEELS, L. (1996b): The origins of intelligence. Proceedings of the Carlo Erba Foundation Conference on Artificial Life. Fondazione Carlo Erba, Milano.

STEELS, L., STUER, P., VEREERTBRUGGHEN, D. (Manuskript): Issues in the physical realisation of autonomous robotic agents.

WAHLSTER, W. (1997): VERBMOBIL. Erkennung, Analyse, Transfer, Generierung und Synthese von Spontansprache, Report 198.

WEIZENBAUM, J. (1976): Computer Power and Human Reason. San Francisco.

Anhang

Im folgenden sind Institutionen aufgelistet, die auf dem Gebiet der KI und der Robotik Forschung betreiben. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Informationen über diese Einrichtungen findet man in den sehr gut strukturierten WWW-Seiten.

Das *Institut für Robotik und Systemdynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt* (DLR) in Oberpfaffenhofen erforscht und entwickelt robotische Systeme für raumfahrttechnische Zwecke und andere Anwendungen.

Der *Fachbereich 1 - „Künstliche Intelligenz“ - der Gesellschaft für Informatik* (GI) ist eine interdisziplinäre Vereinigung aller, die an der KI und ihrer Anwendung beruflich interessiert sind. Er richtet alljährlich die Tagung *Künstliche Intelligenz* aus und es werden Fachausschüsse, Fachgruppen und Arbeitskreise zu bestimmten Teilbereichen der KI gebildet:

FACHBEREICHSLEITUNG

Fachgruppe 1.0.1	Kognition
Fachgruppe 1.0.2	KI und Gesellschaft
Fachgruppe 1.0.4	Bildverstehen
Arbeitskreis	Artificial Life
Arbeitskreis	KI an Fachhochschulen

FACHAUSSCHUSS 1.1 METHODEN UND WERKZEUGE DER KI

Fachgruppe 1.1.1	Deklarative KI-Programmierung
Fachgruppe 1.1.2	Konnektionismus
Fachgruppe 1.1.3	Maschinelles Lernen
Fachgruppe 1.1.4/2.3.3	Adaptivität und Benutzermodellierung in interaktiven Softwaresystemen
Fachgruppe 1.1.5	Intelligente Lehr- und Lernsysteme
Fachgruppe 1.1.6	Verteilte KI

FACHAUSSCHUSS 1.2 INFERENZSYSTEME

Fachgruppe 1.2.1	Deduktionssysteme
------------------	-------------------

Fachgruppe 1.2.2	Nichtmonotones Schließen
Fachgruppe 1.2.3	Qualitatives Schließen
Fachgruppe 1.2.4	Fuzzy-Systeme
Fachgruppe 1.2.5	Wissensrepräsentation
FACHAUSSCHUSS 1.3	NATÜRLICHE SPRACHE
Fachgruppe 1.3.1	Natürlichsprachliche Systeme
Arbeitskreis	Sprachgenerierung
Fachgruppe 1.3.2	Gesprochene Sprache
FACHAUSSCHUSS 1.4 und 4.3	ROBOTERSYSTEME --- “ ---
FACHAUSSCHUSS 1.5	EXPERTENSYSTEME
Fachgruppe 1.5.1	Knowledge Engineering
Fachgruppe 1.5.2	Diagnostik und Klassifikation
Fachgruppe 1.5.3	Planen und Konfigurieren
Fachgruppe 1.5.4	Fallbasiertes Schließen

Einige deutsche KI-Institute haben sich am 1.10.1990 zu einer *Arbeitsgemeinschaft Künstliche Intelligenz* (AKI) zusammengeschlossen. Die Mitgliedsinstitute betrachten die KI als eine Querschnitts- und Schlüsseltechnologie, deren Wirkung weit in das nächste Jahrtausend reichen wird. Folgende Institute sind Mitglieder im AKI:

1. Bayerisches Forschungszentrum für Wissensbasierte Systeme (FORWISS; Erlangen, München, Passau).
2. Deutsches Forschungszentrum für künstliche Intelligenz GmbH (DFKI; Kaiserslautern, Saarbrücken)
3. Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung (FAW, Ulm)
4. Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD; Sankt Augustin) Forschungsbereich KI
5. Forschungsnetz KI-NRW
6. Labor für Künstliche Intelligenz der Universität Hamburg

Mitglieder des *European Coordinating Committee for Artificial Intelligence* (ECCAI):

- ACIA (Spanien)
Catalan Association for Artificial Intelligence (Associació Catalana d'Intelligència Artificial).
- ADUIS (Ukraine)
Association of Developers and Users of Intelligent Systems.
- AEPIA (Spanien)
Spanish Association for Artificial Intelligence (Asociación Española para la Inteligencia Artificial)
- AFCET (Frankreich)
French Society for Information and Systems Sciences and Technology (Association Française des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes)
- AFIA (Frankreich)
French Association for Artificial Intelligence (Association Française pour l'Intelligence Artificielle)
- AIAI (Irland; ruhende Mitgliedschaft)
Artificial Intelligence Association of Ireland
- AIIA (Italien)
Italian Association for Artificial Intelligence (Associazione Italiana per l'Intelligenza Artificiale)
- APPIA (Portugal)
Portuguese Association for Artificial Intelligence (Associação Portuguesa para a Inteligência Artificial)
- ARC (Frankreich)
French Association for Cognitive Science (Association pour la Recherche Cognitive)

- BAAI (Belgien; ruhende Mitgliedschaft)
Belgian Association for Artificial Intelligence
- BAIA (Bulgarien)
Bulgarian Artificial Intelligence Association
- BCS-SGES (Großbritannien)
British Computer Society Specialist Group on Expert Systems
- CSKI (Tschechische Republik)
Czech Society for Cybernetics and Informatics (Ceská společnost pro kybernetiku a informatiku)
- DAIS (Dänemark)
Danish Artificial Intelligence Society
- EETN (Griechenland)
Hellenic Artificial Intelligence Association
- FAIS (Finnland)
Finnish Artificial Intelligence Society (Suomen Tekoälyseura ry)
- GI/KI (Deutschland) German Informatics Association (Gesellschaft für Informatik; Sektion KI e.V.)
- IAAI (Israel)
Israeli Association for Artificial Intelligence
- LANO (Lettland)
Latvian National Organisation of Automatics (Latvijas Automatikas Nacionala Organizacija)
- LIKS-AIS (Litauen)
Lithuanian Computer Society - Artificial Intelligence Section (Lietuvos Kompiuterininku Sajunga)
- NAIS (Norwegen)
Norwegian Artificial Intelligence Society

- NJSZT (Ungarn)
John von Neumann Society for Computing Sciences (Neumann János Számítógéptudományi Társaság)
- NVKI (Niederlande)
Dutch Association for Artificial Intelligence (Nederlandse Vereniging voor Kunstmatige Intelligentie)
- ÖGAI (Österreich)
Austrian Association for Artificial Intelligence (Österreichische Gesellschaft für KI)
- RAAI (Rußland)
Russian Association for Artificial Intelligence
- SAIS (Schweden)
Swedish Artificial Intelligence Society
- SGAICO (Schweiz)
Swiss Group for Artificial Intelligence and Cognitive Science (Schweizer Informatiker-Gesellschaft)
- SLAIS (Slovenien)
Slovenian Artificial Intelligence Society (Slovensko drustvo za umetno inteligenco)
- SSAISB (Großbritannien)
Society for the Study of Artificial Intelligence and Simulation of Behaviour
- SSKI SAV (Slowakische Republik)
Slovak Society for Cybernetics and Informatics at Slovak Academy of Sciences (Slovenská spoločnosť pre kybernetiku a informatiku pri Slovenskej akadémii vied)

Der Fachbereich 1 „KI“ der Gesellschaft für Informatik (GI) richtet zur Zeit die WEB-Seite „KI-Forschung und Lehre“ ein, die im wesentlichen aus Verweisen auf die Homepages von KI-Instituten, -Fachbereichen oder KI-Arbeitsgruppen besteht. Hier findet man folgende Institute und Forschungseinrichtungen an Universitäten bzw. Fachhochschulen in Deutschland, die häufig sehr eng mit den oben aufgeführten Instituten zusammenarbeiten:

Universitäten:

- Aachen: Lehr- und Forschungsgebiet Theoretische Informatik, RWTH Aachen
- Berlin: Lehr- und Forschungsgebiet Künstliche Intelligenz am Institut für Informatik der Humboldt-Universität Berlin
- Bielefeld: Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme (KI) der Univ. Bielefeld
- Bonn: Institut für Informatik III der Universität Bonn
- Bremen: Arbeitsgruppe KI der Universität Bremen
- Chemnitz: Künstliche Intelligenz an der TU Chemnitz
- Darmstadt: Fachgebiet Inferenzsysteme des Fachbereich Informatik der TH Darmstadt
Fachgebiet Intellektik des Fachbereich Informatik der TH Darmstadt
- Dortmund: Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz, Universität Dortmund
- Dresden: Institut für Künstliche Intelligenz an der Fakultät für Informatik der TU Dresden
- Duisburg: Computerlinguistik an der Gerhard-Mercator-Universität
- Erlangen-Nürnberg: Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz (IMMD VIII) der Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Mustererkennung, Universität Erlangen-Nürnberg, Forschungsgruppe Wissensverarbeitung, Bayerisches Forschungszentrum für Wissensbasierte Systeme (FORWISS)

- Freiburg: AG Grundlagen der Künstlichen Intelligenz an der Albert-Ludwigs-Universität
- Hagen: Lehrgebiet Praktische Informatik VIII
- Hamburg: Arbeitsbereich NatS, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg
 Arbeitsbereich Kognitive Systeme, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg
 Labor für Künstliche Intelligenz (LKI), Fachbereich Informatik, Universität Hamburg
 Arbeitsgruppe IMA, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg
- Hannover: Institut für Rechnergestützte Wissensverarbeitung der Universität Hannover, Professor Wolfgang Nejdl
- Kaiserslautern: Arbeitsgruppe Algorithmisches Lernen der Univ. Kaiserslautern
 Arbeitsgruppe Künstliche Intelligenz - Expertensysteme der Univ. Kaiserslautern
 Zentrum für Lernende Systeme und Anwendungen der Univ. Kaiserslautern
- Karlsruhe: Forschungsgruppe/Lehrstuhl Wissensbasierte Systeme, Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren, Universität Karlsruhe
- Koblenz: Arbeitsgruppe Künstliche Intelligenz der Univ. Koblenz
 Computerlinguistik und KI an der Universität Koblenz-Landau
- Leipzig: KI an der Univ. Leipzig
- München: Arbeitsgruppe „Automated Reasoning“ am Institut f. Informatik der TU München
 Gruppe „Modellbasierte Systeme und Qualitatives Schließen“ an der TU München
 Theoretical Informatics and Foundations of AI (Professor Dr. W. Brauer) TU München

- Osnabrück: Studiengang Computerlinguistik und Künstliche Intelligenz
 Institut für Semantische Informationsverarbeitung
- Saarbrücken: Lehrstuhl KI von Professor Dr. Wolfgang Wahlster
 Arbeitsgruppe Professor Dr. Joerg Siekmann
 Institut für Computerlinguistik an der Universität Saarbrücken
 Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI)
 Forschungsbereich Programmiersysteme, DFKI Saarbrücken
- Stuttgart: KI/Bildverarbeitung an der Universität Stuttgart, Professor Dr. Levi
 Abteilung Intelligente Systeme des Instituts für Informatik
- Ulm: Abteilung Künstliche Intelligenz, Universität Ulm
- Würzburg: Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz und Angewandte Informatik der Universität Würzburg

Fachhochschulen:

- Brandenburg: KI-Labor der FH Brandenburg
- Braunschweig/
 Wolfenbüttel: KI an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel
- Emden: KI an der Fachhochschule Ostfriesland
- Hamburg: KI-Aktivitäten an der FH-Hamburg
- Leipzig: Forschungsgebiet Deduktion der HTWK Leipzig
- Trier: Projekt Wissensbasierte Dokumentanalyse am Fachbereich Angewandte Informatik der Fachhochschule Trier

In der Grauen Reihe sind bisher erschienen:

- 1 Technikfolgenabschätzung: Konzeptionen im Überblick; Carl Friedrich Gethmann, Armin Grunwald, 9/96; 2. Aufl. 7/98
- 2 Umweltprobleme und globaler Wandel als Thema der Ethik in Deutschland; Carl Friedrich Gethmann, 9/96; 2. Aufl. 10/98
- 3 Sozialverträgliche Technikgestaltung: Kritik des deskriptivistischen Verständnisses; Armin Grunwald, 10/96
- 4 Technikfolgenbeurteilung der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien. Perspektiven in der Verkehrstechnik. Endbericht zum Vorprojekt; Arbeitsgruppe Neue Materialien, 1/97
- 5 Zur Wissenschaftstheorie der Genetik. Materialien zum Genbegriff; Mathias Gutmann, Peter Janich, 4/97
- 6 Klimavorhersage und -vorsorge; Stephan Lingner, Carl Friedrich Gethmann, 7/97
- 7 Xenotransplantation. Ethische Fragen und Probleme; Jan P. Beckmann, 7/97
- 8 Perspektiven der Robotik. Überlegungen zur Ersetzbarkeit des Menschen; Michael Decker, 11/97
- 9 Philosophie in Rußland. Tendenzen und Perspektiven; Carl Friedrich Gethmann, Nikolaj Plotnikov, 5/98
- 10 Technikfolgenbeurteilung in Ländern Mittel- und Osteuropas; Gerhard Banse (Hrsg.), 6/98
- 11 Biodiversitätsforschung in Deutschland. Potentiale und Perspektiven; Mathias Gutmann, Wilhelm Barthlott (Hrsg.), 11/98; 2. Aufl. 4/00
- 12 Biodiversität als Problem der Naturethik. Literaturreview und Bibliographie; Thorsten Galert, 12/98
- 13 Geistiges Eigentum und Copyright im multimedialen Zeitalter. Positionen, Probleme, Perspektiven; Gerhard Banse, Christian J. Langenbach (Hrsg.), 2/99

- 14 Materials Science in Europe; Karl-Michael Nigge, 3/99
- 15 Modelling Climate Change and its Economic Consequences. A review; Meinhard Schröder, Stephan Lingner (eds.), 6/99
- 16 Robotik. Einführung in eine interdisziplinäre Diskussion; Michael Decker (Hrsg.), 9/99
- 17 „Protection Profile“ – Ein industriepolitischer Ansatz zur Förderung des „neuen Datenschutzes“; Otto Ulrich, 11/99
- 18 Zur Umweltgefährdungsbewertung von Schadstoffen und Schadstoffkombinationen durch Reichweiten- und Persistenzanalyse; Ulrich Müller-Herold, Martin Scheringer, 12/99
- 19 Environmental Standards. Combined Exposures and their Effects on Human Beings and their Environment (Summary); Christian Streffer et al., 1/00
- 20 Genetische Diagnostik und Versicherungsschutz. Die Situation in Deutschland; Felix Thiele (Hrsg.), 1/00
- 21 Entwicklung und Innovation; Michael Weingarten, 4/00
- 22 The Species Concept in Prokaryotic Taxonomy; Ramon Roselló-Mora, Rudolf Amann, 8/00
- 23 Präventiver Bodenschutz. Problemdimensionen und normale Grundlagen; Stephan Lingner, Erik Borg, 9/00
- 24 Embryo Experimentation in Europe; Minou Bernadette Friele (Hrsg.), 2/01
- 25 Tierschutz als Staatsziel? Naturwissenschaftliche, rechtliche und ethische Aspekte; Felix Thiele (Hrsg.), 2/01
- 26 Technikphilosophie und Technikfolgenforschung in Russland; Vitaly G. Gorokhov, 2/01

