

of impact identified in the screening section. This is achieved by more specific questions in particular areas.

Each question in the scoping section is organised into a broader assessment and into more specific multiple choice sub-questions that aim at a more precise specification of the assessment. The user is assisted in replying to the first part of the question by means of background information that can be accessed ticking the more information needed box.

Further information and guidance may be needed by the user to complete these questions, and in some instances it may be necessary to obtain specialist expertise to complete a fuller assessment.

4. The project team

Dr. Per Sorup, Head of Unit, European Commission DG JRC-IPTS, Seville, Spain.

The coordinator of the project is *Dr. Fabio Leone* (European Commission DG JRC-IPTS).

The other members of the project team are *Dr. Jens Hemmelskamp* (European Commission DG JRC-IPTS), *Nathalie Vercrusse* (European Commission DG Enterprise), *Diana Bradford* (Centre for Exploitation of Science and Technology), *Prof. Antonello Zanfei* (Chieti Urbino Siena Technology Organization Management), *Helena Valve* (Finnish Environment Institute) and *Prof. Bo Elling* (University Roskilde).

Contact

European Commission
JRC-Institute for Prospective Technological Studies

Jens Hemmelskamp

Tel.: + 34 (0) 954488-395

E-mail: jens.hemmelskamp@jrc.es

Fabio Leone

Tel.: + 34 (0) 954488-301

E-mail: fabio.leone@jrc.es

European Commission, DG Enterprise

Nathalie Vercrusse

E-mail: nathalie.vercrusse@DG3.cec.be

»

Mikrosystemtechnik – Wann kommt der Durchbruch?

von **Matthias Schünemann**, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, und **Volker Hüntrup**, Universität Karlsruhe

Das Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg hat eine Studie zur Untersuchung der wirtschaftlichen Potentiale der Mikrosystemtechnik aus industrieller Sicht in Auftrag gegeben. Beteiligte Institutionen waren das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, das Institut für Werkzeugmaschinen-technik (wbk) der Universität Karlsruhe und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart. Auf der Basis von empirischen Erhebungen in den USA, Japan und Deutschland sollte eine möglichst realitätsbezogene Einschätzung der industriellen Miniaturisierungspotentiale vorgenommen und die Strategien und Wettbewerbspositionen wichtiger Akteure aufgezeigt werden, Innovations- und Diffusionshemmnisse identifiziert und vergleichende Aussagen über Miniaturisierungspotentiale und damit verbundene Technologieentwicklungen gemacht werden. Der Abschlußbericht zu der Studie liegt jetzt vor.

Weltweite Förderung, aber keine Produkte?

Technologische Miniaturisierung wird seit den achtziger Jahren in einen engen Zusammenhang mit der Mikrosystemtechnik gebracht. Dies gilt insbesondere für das Land Baden-Württemberg, das durch die Mikromechanik eine konsequente Fortentwicklung seiner traditionellen Stärke in elektromechanischen Industrietechnologien erwartet. Die Mikrosystemtechnik wurde und wird als Schlüsseltechnologie mit einem der Mikroelektronik vergleichbaren Potential gesehen. In der Annahme, dass über technologische Vorsprünge in der Mikrosystemtechnik auch der verlorene Anschluss in der Mikroelektronik aufgeholt und sogar Technologieführung erreicht werden könnte, wurde die Mikrosystemtechnik in Deutschland, wie auch in Japan und den USA, bereits früh gefördert.

In Forschungslaboratorien wurden erhebliche Erfolge bei der Entwicklung von Mikro-

strukturierungstechnologien sowohl auf Halbleiterbasis als auch auf Basis von Nichthalbleitermaterialien erzielt und beeindruckende Prototypen miniaturisierter Sensoren, Aktoren und Systeme realisiert. Der Erfolg einzelner Mikrosysteme wie die Beschleunigungssensoren für die Airbag-Auslösung in Kraftfahrzeugen, das laserbasierte TV von Schneider oder Projektionssysteme auf der Basis des Digital Micromirror Device von Texas Instruments haben weltweit für Aufsehen gesorgt. Der Vielfalt von mikrosystemtechnischen Prototypen aus dem Forschungssektor steht jedoch nur eine kleine Minderheit industriell gefertigter mikrosystemtechnischer Produkte gegenüber. Nach inzwischen mehr als zehnjähriger Förderung stellt sich vor allem die Frage, ob die Mikrosystemtechnik die Erwartungen als Träger erneuerter technologischer Wettbewerbsfähigkeit erfüllt.

Zur Untersuchung der wirtschaftlichen Potentiale der Mikrosystemtechnik aus industrieller Sicht wurde seitens des Wirtschaftsministeriums des Landes Baden-Württemberg eine Studie in Auftrag gegeben. Drei Institute kombinierten ihre unterschiedlichen Kompetenzen: das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart. Ziel der Untersuchung war, über empirische Erhebungen in den USA, Japan und Deutschland die Entwicklungsdynamik der industriellen Miniaturisierungspotentiale aus möglichst realitätsbezogener Sicht aufzuzeigen, Strategien und Wettbewerbspositionen wichtiger Akteure zu verstehen, Innovations- und Diffusionshemmnisse sowie konkurrierende Technologiepotentiale zu identifizieren und vergleichende Aussagen über Miniaturisierungspotentiale, damit verbundene Technologieentwicklungen sowie über Technologie- und Innovationsstrategien am Weltmarkt führender Akteure zu gewinnen.

Nationale Miniaturisierungsmuster im Vergleich

Allen drei Ländern gemeinsam ist, dass keine euphorische Haltung von großen Unternehmen gegenüber der Mikrosystemtechnik zu spüren ist. Miniaturisierungspotentiale werden auf

breiter Front erkannt. Technische Lösungen für Miniaturisierungsprobleme werden jedoch nicht unter dem Gesichtspunkt der innovativen Technologie, sondern unter dem Aspekt der technisch-wirtschaftlich günstigsten Lösung geprüft. Die Unternehmen wollen sich nicht mit einer Technik profilieren, wenn deren Miniaturisierungsmöglichkeiten weit über die derzeitigen Miniaturisierungsanforderungen hinausweisen, wenn sie technisch und kostenmäßig noch erhebliche Risiken enthält und wenn sie gegenüber bewährten technischen Lösungen noch keine durchschlagenden Vorteile bietet.

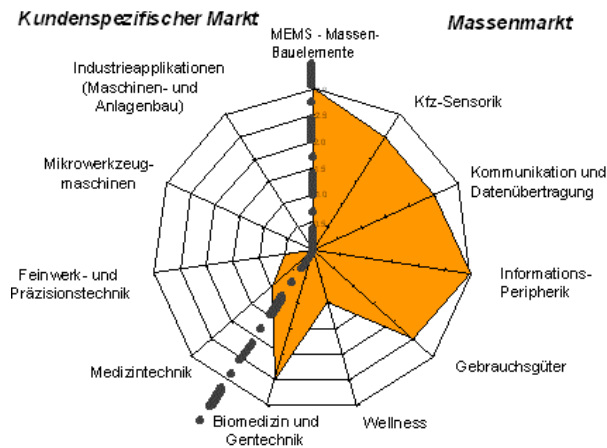
Erhebliche Unterschiede treten jedoch bei den Schwerpunktsetzungen sowohl der Industrie als auch der staatlichen Technologiepolitik auf. Liegt in den USA der Akzent auf der Entwicklung von Basistechnologie für halbleiterbasierte Mikrostrukturierungstechniken, so wurden und werden in Deutschland gerade in den letzten Jahren Verbundprojekte auf unterschiedlichster technologischer Basis gefördert. In Japan hingegen konzentriert sich die Förderung auf nichthalbleiterbasierte Miniaturisierungstechniken mit vorrangig präzisionsmechanischem Hintergrund. Hier reflektieren sich auch die nationale Wirtschaftsstruktur und nationale politische Prioritäten. So bilden in Deutschland der Umweltschutz und periphere Branchen einen Schwerpunkt mikrosystemtechnischer Aktivitäten, der so in den anderen beiden Wirtschaftsräumen nicht existiert. In Japan werden die Themen der geförderten Forschung auf dem Gebiet des Micromachining von der Energiewirtschaft stark beeinflusst, in den USA spielt der verteidigungstechnische Aspekt eine erheblich größere Rolle. Diese Unterschiede werden auch in der unterschiedlichen Definition und Bezeichnung mikrosystemtechnischer Produkte (Mikrosysteme in Deutschland und Europa, Mikromaschinen (Micromachines) in Japan und Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) in den USA) verdeutlicht.

MEMS-Industrie in den USA

Die USA sind derzeit die führende Nation im Bereich der mikrosystemtechnischen Massenprodukte (vgl. Abb. 1), begründbar vor allem durch den technologischen Vorsprung in der Halbleiterfertigung sowohl für Halbleiterpro-

dukte als auch für die Prozesstechnik. Halbleiterbasierte Strukturierungstechniken sind aufgrund ihrer Durchsatzmenge und der notwendigen Geräteinvestitionen prädestiniert für die Massenfertigung von Produkten. Ein Großteil der Unternehmen, die derzeit erfolgreich mit MEMS-Produkten am Markt vertreten sind, hat Erfahrung in der Herstellung von mikroelektronischen Bauteilen. Auch in den Märkten für Kommunikation und Datenverarbeitung, Informationstechnik-Peripherik, Biomedizin und Gentechnik sind US-Unternehmend führend.

Abb. 1: Miniaturisierungsschwerpunkte in den USA



Die Akteurslandschaft wird charakterisiert durch junge *Start-up-Technologieunternehmen*, in deren Hintergrund ausreichend Kapital bereitsteht, weniger durch eine anonyme Venture-Kapital-Szene, sondern zunehmend durch Corporate-Venture-Capital-Initiativen (CVC). Großunternehmen investieren in langfristige aussichtsreiche Technologielinien, getragen von hochqualifizierten Start-up-Unternehmen, die an der Grenze von wissenschaftlicher Forschung zur industriellen Entwicklung arbeiten. Ihnen wird viel Handlungsspielraum, beste Ausstattung und auch ein Misserfolgsbonus für einen zweiten Start gewährt. Technologie- und Managementkompetenzen wirken unter dem ökonomischen Leitbild der Generierung neuer Geschäfte zusammen.

Soweit es um die Entwicklung von MEMS-Technologie geht, vermitteln die Großunternehmen den Eindruck wesentlich erweiterter Technologiehorizonte im Vergleich zu Deutschland. Zwar steht die Nutzung der IC-Technologie als am weitesten verbreitete

MEMS-Fertigungstechnologie unbestritten im Vordergrund. Aber im Vergleich zu Deutschland wird deutlich, dass auch die führenden Unternehmen der Informationstechnik sowie Daten- und Telekommunikationsindustrie mit ihren großen Marktanteilen über wesentlich größere Ressourcen und damit breitere Entwicklungsperspektiven verfügen als deutsche Unternehmen.

Im Hinblick auf technologische Konzepte wird kostensenkenden Ansätzen zentrale Bedeutung zugemessen. Das bedeutet einerseits eine Präferenz für monolithische Lösungen. Andererseits wird viel Wert auf rationelle Aufbau- und Verbindungstechniken gelegt, weil hier in der Praxis die meisten Kosten anfallen. Für den amerikanischen Markt gelten als Kosten vor allem die Investitionskosten. Die Lebenskosten eines Produktes spielen in diesem Markt derzeit noch eine untergeordnete Rolle.

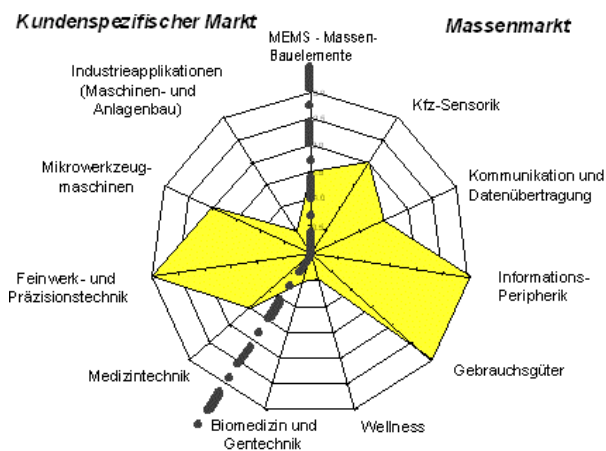
Der langjährige Erfolg dieser Branche in den USA führte aber auch zu einer Infrastruktur, die kleineren Unternehmen mit beschränkter Investitionsfähigkeit die Möglichkeit zur Herstellung eigener Produkte gibt: Für unterschiedliche Fertigungstechniken der Halbleiterindustrie stehen Foundries zur Verfügung, die industriell arbeitende Lohnfertiger zur Herstellung von Komponenten für die Mikrosystemtechnik darstellen. Diese Lohnfertiger stehen untereinander in Konkurrenz, was Qualität und Zuverlässigkeit sichert. Als Lohnfertiger haben sie keine eigenen Produkte, so dass sie selber keine Konkurrenz zu ihren Auftraggebern, die durch ihre Aufträge einen großen Teil Produkt-Know-how weitergeben, darstellen.

Micromachining in der japanischen Industrie

Generell besteht in Japan ein deutlicher Trend zur Miniaturisierung und Mikrosystemtechnik, der daran zu erkennen ist, dass fast alle interviewten Firmen die Miniaturisierung und die damit verbundene Technologie als ein strategisch wichtiges Thema bezeichnen und Firmen, die schon länger als fünf Jahre im Bereich der Miniaturisierung aktiv sind, ihre Forschungsaktivitäten weiter verstärken oder zumindest beibehalten. Dennoch ist nicht damit zu rechnen, dass kurzfristig miniaturisierte Komponenten und Systeme in der Breite den Markt durchdringen werden.

Die japanischen Unternehmen sind in bezug auf die Miniaturisierung insbesondere in Massenmärkten aktiv, in denen sie eindeutig über die Marktführerschaft verfügen (vgl. Abb. 2). Dazu gehören die Informationstechnik-Peripherik sowie die Gebrauchsgüter wie Kameras etc. Neben diesen zu erwartenden Schwerpunkten haben sich die Japaner einen Know-how-Vorsprung in der Präzisions- und Feinwerktechnik sowie im Werkzeugmaschinenbau erarbeitet.

Abb. 2: Miniaturisierungsschwerpunkte in Japan



Die Akteurslandschaft wird von Konzernen geprägt. Deren nur begrenzt transparentes strategisches Verhalten spiegelt eine technologische Langfristorientierung wider, die sich an geschäftlichen Zukunftsvisionen – teilweise industriepolitisch bedingt – orientiert. In Japan scheinen zentrale F&E-Labore der Großunternehmen teilweise noch Freiheiten langfristiger Vorlauforschung zu haben, die in Europa und Deutschland zu Gunsten einer dezentralisierten Geschäftsfeldanbindung der Forschung und Entwicklung stark reduziert wurden. Dies gilt z.B. für die Nutzung von Synchrotronstrahlungsquellen und LIGA-Technik, Technologieansätzen, denen deutsche Unternehmen sehr kritisch gegenüberstehen.

Im Hinblick auf die zentralen Technologiekonzepte räumt Japan im Vergleich zu den USA und Deutschland der konventionellen Miniaturisierung die weitaus größte Rolle ein. Japanische Großunternehmen erarbeiten sich offensichtlich neben den halbleiterbasierten Fertigungstechniken ein zweites technologisches Standbein.

Die Produktionstechnik für miniaturisierte Komponenten wird von japanischen Unternehmen als Kern-Know-how angesehen und fast ausschließlich selbst entwickelt. Das erworbene Know-how wird so lange im Unternehmen bewahrt, bis ein Konkurrent in der Lage sein könnte, die Kernkomponente selbst zu fertigen oder Produktionsmaschinen dazu auf dem Markt anzubieten. Ist die Konkurrenz mit einem vergleichbaren Produkt kurz vor dem Markteintritt, werden die eigenentwickelten Maschinen auf dem Markt angeboten. Dadurch werden Unternehmen, deren Kerngeschäft eigentlich die Komponentenfertigung ist, zu Anbietern auf dem Markt der Werkzeugmaschinen und des Anlagenbaus.

Mikrosystemtechnische Industrie in Deutschland

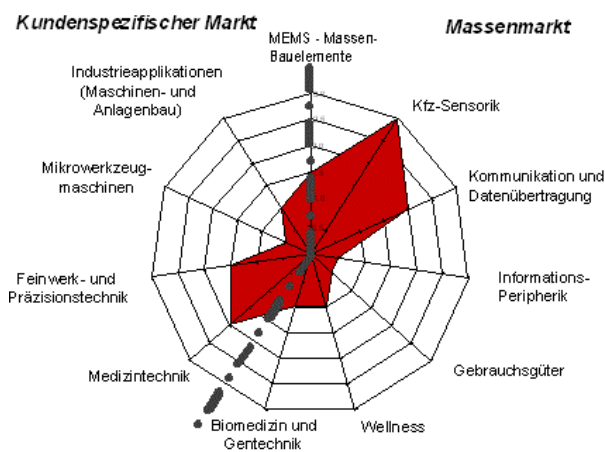
Deutschland kann über einen weltweit durchaus als führend angesehenen und in seiner Breite singulären Entwicklungsstand in nahezu allen relevanten Mikrostrukturierungstechnologien verfügen. Technologisch führende Miniaturisierungsentwicklungen werden jedoch zu einem großen Teil im wissenschaftlichen Instandesektor durchgeführt, der dann die Aufgabe hat, den zurückhaltenden Unternehmenssektor von der Mikrosystemtechnik zu überzeugen.

Die Akteurslandschaft wird von wenigen Großunternehmen und einer größeren Anzahl mittlerer Unternehmen geprägt, deren Kernkompetenz durch kundenorientiertes Applikationsengineering geprägt ist. Große Unternehmen beschäftigen sich aktiv mit den Chancen und Risiken der Mikrosystemtechnik. Sie konzentrieren sich auf Produkte, die sich in hohen Stückzahlen kostengünstig mit halbleiterbasierten Mikrostrukturierungstechniken fertigen und erfolgreich am Markt absetzen lassen. Dabei versuchen diese Unternehmen, mit der Marktführerschaft auch die Technologie- und Kostenführerschaft zu übernehmen. Schrittmachermarkt ist nach wie vor der Kraftfahrzeugzuliefermarkt. Mittelständische deutsche Unternehmen profilieren sich mit vielfältigen Applikationsentwicklungen, die produktmäßig ausreifen werden, wenn sich die Mikrosystemtechnik zur Querschnittstechnologie entwickelt haben wird und die entsprechenden Vorprodukte und Fabrikausrüstungen kostengünstig

beschafft werden können. Mittelständische Unternehmen sind führend in den Märkten Medizintechnik und Industrieanwendungen (vgl. Abb. 3).

Auf Grund der mittelständischen Größenstruktur wird weniger auf großtechnologische Innovationsführung Wert gelegt als auf die problemlösende Fähigkeit zur Kombination vielfältiger Technologie. Im Hinblick auf die zentralen Miniaturisierungstechnologien betrachten Großunternehmen die halbleiterbasierte Technologie als die derzeit industriell relevante Fertigungstechnik, die es auszunutzen gilt. Der Institutesektor setzt gleichwertig auf nicht halbleiterbasierte Technologie.

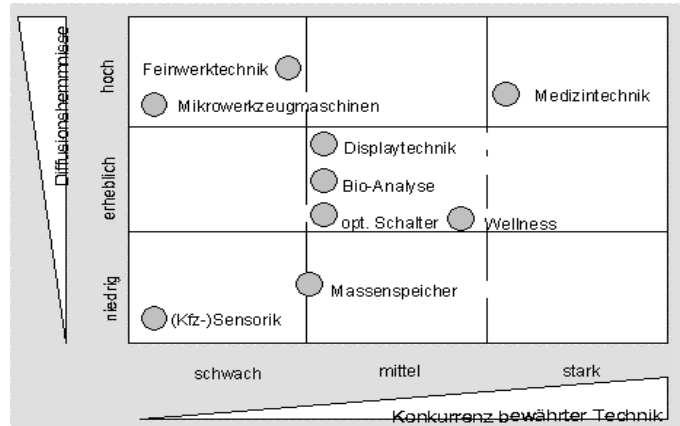
Abb. 3: Miniaturisierungsschwerpunkte in Deutschland



Wann kommt der Durchbruch?

Die Darstellung der Möglichkeiten und Potentiale der Mikrosystemtechnik kann leicht zu übertriebenen Markterwartungen führen. Angaben zum Marktpotential und zur zeitlichen Marktdurchdringung von Mikrosystemen finden sich häufig in Marktstudien, die ihre Daten vorwiegend aus Einschätzungen der Anbieterseite bzw. interessierter Experten gewinnen. Das führt systematisch zu quantitativen Scheingenauigkeiten und Überschätzungen. Qualitative Abschätzungen des Marktpotentials, der zeitlichen Marktdurchdringung, der konkurrierenden technologischen Ansätze und der auftretenden Diffusionshemmnisse (Abb. 4) zeichnen häufig ein realistischeres Bild.

Abb. 4: Diffusionshemmnisse für angewandte mikrosystemtechnische Produktgruppen



Die mikrotechnische Miniaturisierung von Komponenten und Systemen verläuft derzeit noch auf vielen Einzelpfaden. Sie bringt einzelne Erfolgsbeispiele hervor (z.B. Tintenstrahl-druckkopf, Beschleunigungssensor, Drucksensor, digitale Projektionssysteme). Eine gemeinsame Basistechnologie wie in der Mikroelektronik, die der Mikrosystemtechnik zu einem breiten, überraschenden Marktdurchbruch verhelfen könnte, hat sich nicht herausgebildet. Es gibt auch keine Hinweise auf Überraschungspotentiale, die den Technologiewettbewerb zwischen den untersuchten Ländern sprunghaft radikal verändern würden.

Schrittmacher der Miniaturisierung lassen sich demgegenüber durchaus identifizieren. Dabei wird die Kraftfahrzeugsensorik auch zukünftig eine der treibenden industriellen Branchen sein. Für die Automobilindustrie entwickelte und in Halbleitertechnologie gefertigte Sensoren eröffnen sich Applikationen in anderen Märkten (z.B. der Gebrauchsgüterindustrie oder dem Maschinen- und Anlagenbau). Die Kombination modularer mikrosystemtechnischer Bausteine mit intelligenter Signalaufbereitung eröffnet dabei bisher nicht zugängliche Miniaturisierungspotentiale. Schreib-/Leseköpfe für Massendatenspeicher, die für neue Speicherprinzipien mit hohen Speicherdichten entwickelt werden und fast ausschließlich auf mikrosystemtechnischen Ansätzen basieren, stellen eine weitere Schrittmacheranwendung dar. Hochminiaturisierte biochemische Analysesysteme werden nicht nur in der Genanalyse oder in der Bestimmung von Krankheitsbildern Einsatz finden, sondern auch Wellness-Monitoring-

Funktionen bei gesunden Menschen übernehmen. Diese biochemischen Sensoren könnten in einem weiteren Schritt auf die umweltbezogene Sensorik ausstrahlen.

Im Kern zeigt sich bei der Mikrosystemtechnik ein durchaus typisches Entwicklungsmuster. Danach wird eine neue, komplexe Basistechnologie erst dann in breiter Front marktwirksam, wenn verschiedene technologische Entwicklungslinien ausreifen und zusammenwirken. Derartige Entwicklungen benötigen technologische Vorlaufzeiten von 10 - 15 Jahren. Der Marktdurchbruch der Mikrosystemtechnik mit querschnittshaften Anwendungspotentialen wird daher erst in fünf bis sieben Jahren erwartet.

Bibliographische Angaben

Bierhals, R.; Cuhls, K.; Hüntrup, V.; Schünemann, M.; Thies, U.; Weule, H.: Mikrosystemtechnik – Wann kommt der Marktdurchbruch? Berlin: Physica-Verlag, 1999.

Kontakt

Matthias Schünemann
Fraunhofer IPA Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 970 1541
E-mail: mps@ipa.fhg.de

Volker Hüntrup
wbk der Universität Karlsruhe
Tel.: + 49 (0) 721 608 4288
e-mail: volker.huentrup@mach.uni-karlsruhe.de

»

Robotik. Optionen der Ersetzbarkeit des Menschen

von Michael Decker, Europäische Akademie Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Die Europäische Akademie führt seit Februar 1999 ein zweijähriges Forschungsprojekt zum Thema Robotik durch. Ziel ist es, bereits entwicklungsbegleitend die Möglichkeiten des Einsatzes autonomer Roboter zu beurteilen. Dabei sollen im Sinne der Rationalen Technikfolgenbeurteilung transdisziplinäre Kriterien entwickelt werden, an-

hand derer die Ersetzung menschlicher Fähigkeiten durch autonome künstliche Agenten als wünschenswert oder nicht wünschenswert eingestuft werden kann. Zu diesem Zweck wurde eine interdisziplinär besetzte Expertengruppe berufen. Die Argumentationsketten und die daraus resultierenden Handlungsempfehlungen werden in einem Memorandum veröffentlicht. Die Fallbeispiele werden aus dem Bereich der medizinischen Anwendung gewählt.

Hintergrund

Roboter müssen über eine Reihe von Grundfähigkeiten verfügen, wenn sie in die Lage versetzt werden sollen, in der Welt Handlungen auszuführen. Zu diesen Grundfähigkeiten gehören beispielsweise die Möglichkeit der (Fort-) Bewegung, die häufig durch Räder realisiert wird. Alternativ werden auch "natürliche" Fortbewegungsarten durch die Konstruktion von Beinen, Flügeln, Schuppen, Flossen, u.ä. kopiert. Die Möglichkeit der Wahrnehmung wird durch Kameras und andere Sensoren implementiert, aus deren Daten ein Modell der Umwelt erstellt wird. Der dritte wichtige Aspekt besteht in der Möglichkeit zu lernen, wobei das Lernen von Bewegungsabläufen, das Lernen der Interpretation des Weltmodells und das Lernen reflexiver Betrachtungsweisen, z. B. wie sich ein Roboter selbst in seine Umwelt einordnet, als die bedeutendsten Bereiche angesehen werden. Roboter, die über diese Möglichkeiten des Handelns verfügen, werden "autonome Roboter" genannt.

Ist beispielsweise für das Erfüllen der Aufgabe eine Bewegung des gesamten Roboters notwendig, so wird auf Grundlage der Sensordaten eine Landkarte von der unmittelbaren Umgebung entwickelt, innerhalb welcher kollisionsfreie Bewegungsbahnen berechnet werden können. Bei der Umsetzung des Handlungsplanes werden ununterbrochen die Daten der Sensoren ausgelesen und in die kurzfristige Planung mit einbezogen. Auf Grundlage der aktuellen Daten entwickelt die Steuerung eigenständig Alternativpläne. Der Robotersteuerung sind verschiedene Handlungsoptionen implementiert, die je nach Aufgabenstellung mehr oder weniger praktikabel sind. Gleichzeitig verfügt die Robotersteuerung über die Möglichkeit, erfolgreiche und nicht erfolgreiche Handlungs-