

Mikrorobotik

Verena HAMBURGER

Klappengasse 114 b, 67105 Schifferstadt

E-mail: wolf-heart@gmx.de

Auch wenn es den meisten Menschen nicht bewußt ist, spielt die Mikrotechnik schon heute eine immer größere Rolle in unserem täglichen Leben. Sie erscheint in den verschiedensten Ausprägungen, sichtbar und unsichtbar, und ihr Einfluss wird in Zukunft sogar noch stärker zunehmen. Doch obwohl das Potential noch nicht ausgeschöpft ist, dringt man bereits in noch kleinere Dimensionen vor.

1 Einleitung

Schon heute gilt die Nano- und Mikrotechnik als Schlüsseltechnologie oder gar als die industrielle Revolution des 21. Jahrhunderts. Erste Anstrengungen in dieser Richtung wurden dabei in Japan unternommen. Heute existieren weltweit über 200 Nanoforschungszentren – davon 60 in Europa. Aktuelle Entwicklungen und Forschungsansätze sind größtenteils interdisziplinär und verbinden damit sowohl molekularbiologische, chemische als auch physikalische und elektrotechnische Ideen zu einer neuen Ingenieursdisziplin, mit deren Hilfe es möglich sein soll, das „unterste Limit“ zu erreichen [6], [2].

Obwohl erst wenige komplett und ausgereift sind, prophezeit man Mikrosystemen verschiedenster Ausprägungen ein sehr breites Anwendungsgebiet beispielsweise in der Medizin, der Bio- und Verfahrenstechnik, der Mikromontage, Meteorologie und sogar dem täglichen Hausgebrauch.

So macht sich der Mensch diese hohe Präzision u.a. für hochempfindliche Testsysteme (z.B. für Mikrochips) und für die sog. Minimally Invasive Surgery (MIS) zu Nutzen, mit deren Hilfe Operationen, wie ein Bypass, durch kleinste Einschnitte zwischen den Rippen möglich sind. Sogar Inspektionen und Arbeiten in dem Menschen unzugänglichen oder gesundheitsschädlichen Gebieten sind möglich.

Das am meisten erforschte Anwendungsgebiet von Mikrotechnik ist die Mikromontage, da die menschliche Hand zwar sehr geschickt ist, jedoch zu grob zur Handhabung von Teilen im Mikrometerbereich. Oft ist es allerdings notwendig konventionelle Teile und Mikrokomponenten zu kombinieren, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Solche Ansätze erfordern dann eine sehr genaue Abstimmung und eine sehr hohe Flexibilität des Montagesystems.

2 Allgemeine Klassifizierung von Mikrosystemen

Einige Komponenten wie Aktuatoren, Sensoren und eine Datenverarbeitungseinheit haben natürlich alle Mikrosysteme gemein. Da diese sehr unterschiedlich sein können gibt es verschiedene Klassifizierungsmöglichkeiten, die unabhängig davon eine erste grobe Einteilung vornehmen.

2.1 Einteilung nach Größe

Die erste offensichtliche Einteilung richtet sich nach der Größe der Systeme selbst. Am weitesten verbreitet sind die Minisysteme. Sie reichen von einigen Kubikmillimetern bis maximal wenigen Kubikzentimetern Volumen und werden schon heute intensiv genutzt. Die hier behandelten Mikro- und Nanosysteme stellen die nächst kleineren Stufen dar und sind analog zu den Minisystemen je um drei bzw. sechs Zehnerpotenzen kleiner. Dies ist nur eine sehr grobe Einteilung, da die einzelnen Begriffe nie präzise definiert wurden.

Mikrosysteme werden weitaus weniger eingesetzt. Viele Systeme befinden sich noch in der Testphase – wie z.B. der Miniman -, weshalb auch hier bald mit größerer Verbreitung zu rechnen ist. Das Gebiet der Nanosysteme galt bis vor Kurzem eher als exotisch und wurde eher dem Science-Fiction-Bereich zugeordnet, aber erst vor kurzem wurden auch hier, bsp mit dem Nanoroboter von IBM, große Erfolge erzielt. Man könnte sagen die Nanotechnologie steht heute zwischen Theorie und ersten Prototypen.

Eine zweite Möglichkeit zur Größeneinteilung bezieht sich auf die Größe relativ zum zu manipulierenden Objekt, bzw. dem Verhältnis C der physikalischen Dimensionen des Systems zur maximalen Reichweite seiner Aktuatoren.

Dabei findet man $C \gg 1$ bei großen, stationären Manipulationssystemen, deren Genauigkeit groß gegenüber dem behandelten Objekt ist. $C \ll 1$, d.h. das Objekt ist viel größer als das manipulierende System, kommt dagegen nahezu nie vor. Häufig werden heute Systeme angestrebt deren Reichweite etwa deren Dimension entspricht, also $C \approx 1$. Optimalerweise sollten flexible Mikroroboter sowohl eine sehr hohe Präzision bei der Manipulation, als auch zum Transport geeignete möglichst kleine Abmessungen, d.h. Eigenschaften von $C \gg 1$ und $C \approx 1$, haben.

[1]

2.2 Einteilung nach Konzept & Funktionalität

Hier werden die grundlegenden Eigenschaften eines Systems berücksichtigt, die weitestgehend für die Funktionalität verantwortlich sind. Die wichtigsten sind:

- Mobilität (ja/ nein, evtl. extern z.B. durch Blutströmung)
- Autonomie (ja/ nein)
- Kontrollmöglichkeiten (halbautomatisch/ teleoperiert)
- Energie- und Informationübertragung (evtl. kabellos bsp. Temperatur, magnetisch, optisch, akustisch).

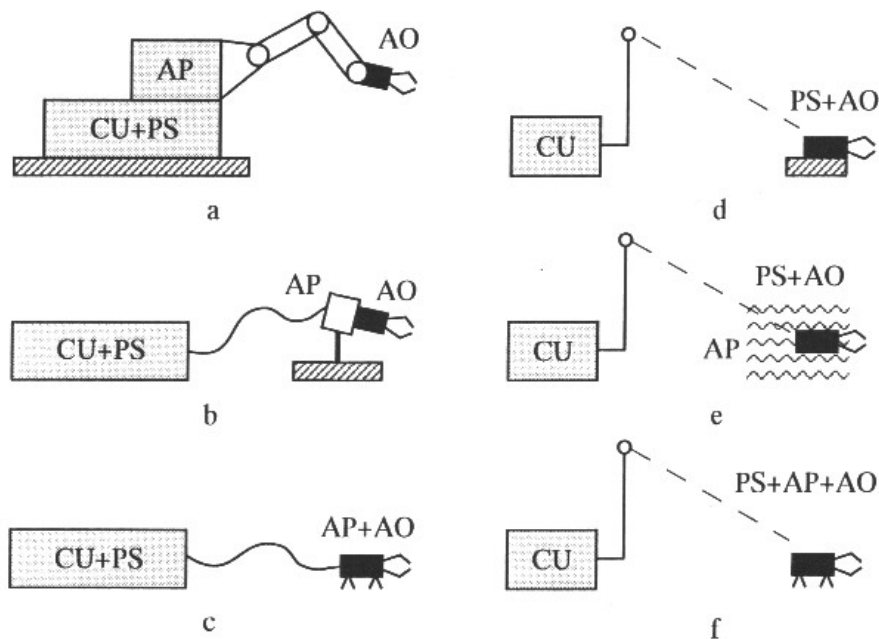


Abb. 1: Verschiedene Realisierungsmöglichkeiten für Mikroroboter

Abb. 1 zeigt hierfür einige Beispiele, wobei PS die Energiequelle, CU die Kontrolleinheit, AP die Aktuatoren zur Positionierung und AO die Manipulationsaktuatoren bezeichnet. Da diese Einteilung zwar sehr aufschlußreich ist, jedoch verschiedenste Kombinationen denkbar sind, kann man zunächst eine konzeptionelle Unterscheidung der wichtigsten Hauptgruppen von Mikrosystemen vornehmen: Mikromaschinen und Mikroroboter.

Vertreter der ersten Gruppe sind passiv, da sie mechanische Arbeit ohne direkte On-board-Kontrolle vornehmen. Im Gegensatz dazu wurde der Begriff der Mikroroboter nie einheitlich festgelegt. Er leitet sich vielmehr aus der Makrowelt ab, d.h. Mikroroboter sind ebenfalls durch ihre Programmierung, ihre aufgabenspezifischen Sensoren und Aktuatoren und ihre i.A. uneingeschränkte Mobilität charakterisiert. [1]

2.3 Parallele und serielle Kinematiken

Bei seriellen Kinematiken (Abb. 2) sind wie beim menschlichen Arm die einzelnen Bewegungsachsen nacheinander geschaltet und können je nach Aufgabe mit Punkt-zu-Punkt-Steuerung, Bahnsteuerung oder Vielpunktsteuerung betrieben werden. Jedes Gelenk das bewegt wird, bewegt also alle folgenden Glieder mit, wodurch sich auch zwangsläufig alle Positionsfehler addieren. Die Ungenauigkeit steigt mit zunehmender Traglast.

Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, benutzt man geschlossene kinematische Ketten (Abb. 2) und steuert die Bewegung über Veränderung der Stablänge oder bewegliche Fußpunkte. Hierbei liegen die Achsen parallel und können nur durch Bahnsteuerung betrieben werden um eventuelle Singularitäten und Kollisionen zu vermeiden. Um die ungewohnte Steuerung bei parallelen Kinematiken auszugleichen,

wird ein geeignetes Transformationsmodul benötigt, da sich die Koordinatensysteme von Maschine und Werkstück unterscheiden.

Die Vorteile gegenüber einer seriellen Kinematik sind v.a. die geringere bewegte Masse, da der Antrieb fest im Gestell und nicht direkt am Gelenk befestigt sein muß. Daraus resultiert eine hohe Strukturfestigkeit und ein günstigeres Massenverhältnis, das bis auf eins reduziert werden kann. Parallele Kinematiken können deswegen eine viel höhere Beschleunigung sowie eine höhere Positionsgenauigkeit erreichen. Sie werden für präzise Kleinteile- und Leiterplattenmontage, sowie für das Bearbeiten von schweren Teilen und das Führen von Laser- und Kleinspiegeln eingesetzt.

Der Nachteil liegt eindeutig in der geringeren Flexibilität. Mit einer seriellen Kinematik können die meisten Punkte des Arbeitsraums durch mehrere Achsstellungen erreicht werden. Diese Eigenschaft ist v.a. nützlich beim Ausweichen von Hindernissen. Es kann also bei seriellen Kinematiken ein größerer Arbeitsraum erreicht werden, der sogar größer ist, als der Aufenthaltsraum des Roboters. Bei parallelen Robotern ist dies meist umgekehrt.

[7] [8]

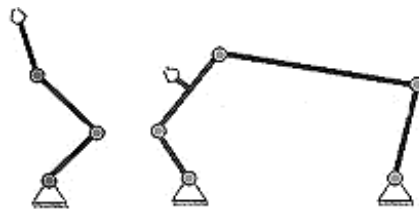


Abb. 2: serielle (links) und parallele (rechts) Kinematik

3 Mikromontage

Die Fertigung von Mikroteilen ist heute kein Problem mehr. Sehr viel schwerer ist es Möglichkeiten zur sinnvollen und kostengünstigen automatisierten Mikromontage zu finden.

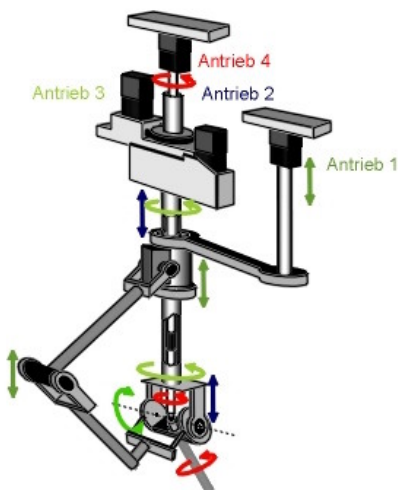


Abb. 3: Schema von PAROS 4

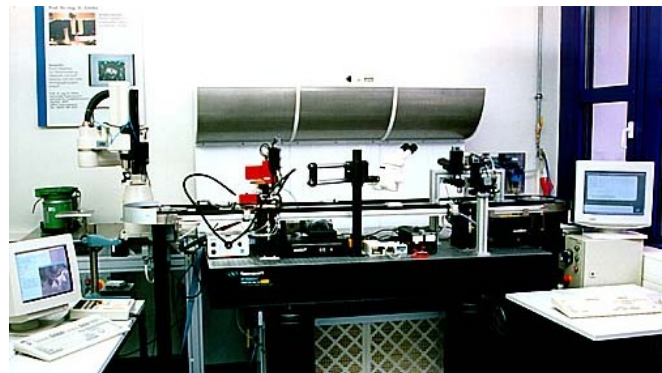


Abb. 4: Foto der Mikromontageanlage des PAK

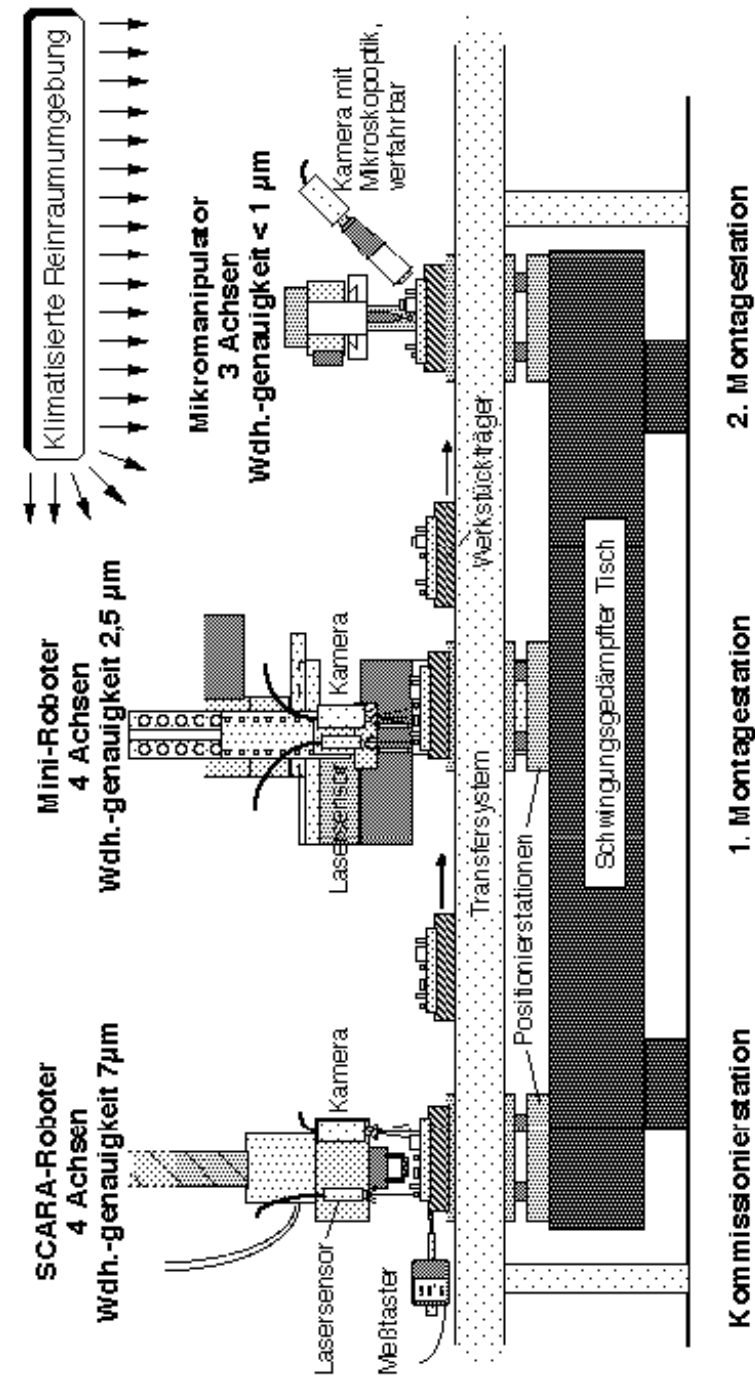


Abb. 5: Schematischer Aufbau der Mikromontageanlage des PAK

Auf Grund ihrer hohen Präzision werden hier häufig Parallelroboter eingesetzt. Durch die Isolierung des Antriebs vom Arbeitsraum, kann ein kostengünstiger lokaler Reinraum geschaffen werden. Da in der Mikromontage ein sehr kleiner Arbeitsraum benötigt wird, kann das ungünstige Verhältnis zum Aufenthalts- bzw. Bauraum des Systems vernachlässigt werden. Die passiven Gelenke einer solchen Parallelstruktur

können ebenfalls viel einfacher verkleinert werden, als das bei seriellen möglich ist. Zur nötigen Genauigkeit werden meist piezogesteuerte Antriebe integriert.

So hat der in Abb. 3 gezeigte Paros 4, eine Parallelstruktur des Fraunhoferinstituts der TU Braunschweig, vier Freiheitsgrade. Der Endeffektor wird gleichzeitig von zwei kinematischen Ketten geführt, die je durch einen hochauflösenden Piezomotor mit Inkrementalantrieb angetrieben werden. Erste Messungen am Prototypen ergaben eine Wiederholgenauigkeit von sieben Mikrometern [8].

Der Lehrstuhl für Produktionsautomatisierung an der Universität Kaiserslautern (PAK) setzt schon im Prototypstadium auf industrienaher Entwicklung. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen v.a. bei der Entwicklung von geeigneten Sensoren und Greifern, neuer Spann- und spezieller Verbindungstechniken.

Grundlage der Forschungsaktivitäten bildet eine hauseigene Montageanlage (Abb. 4 und Abb. 5) bestehend aus einem hochgenauen SCARA-Roboter, zwei speziellen Präzisionsrobotern mit einer Wiederholgenauigkeit von 2,5 µm und einem geeigneten Transfersystem. Um die Umgebungsbedingungen einzuhalten befindet sich die gesamte Anlage auf einem schwingungsgedämpften Tisch. Der Raum ist mit Klimaanlage und Reinraumabsaugung ausgestattet [2].

In vielen Fällen ist Montage durch Systeme gefragt, die etwa der Größe der Einzelteile bzw. des fertigen Werkstücks (also $C \approx 1$) entsprechen. Hier wird die Montage häufig durch mobile Mikroroboter durchgeführt (siehe auch Kapitel 7). [1]

4 Mikrorobotik

Da, wie bereits gesagt, der Begriff Mikrorobotik nie präzise festgelegt wurde, stammt die Definition aus der Makrowelt. Demnach ist ein Roboter ein künstlicher, aktiver Agent, der in der realen Welt agiert, d.h. er trifft selbständig Entscheidungen und verändert aktiv seine Umwelt.

Ein Mikroroboter ist also ebenfalls charakterisiert durch sein Programm, seine aufgabenspezifischen Sensoren, seine Aktuatoren und im Allgemeinen durch uneingeschränkte Mobilität.

Desweiteren unterscheidet man bei Robotern zwei autonome Subsysteme: Aktuatoren zur Manipulation und zur Fortbewegung.

4.1 Einführung in das Miniman-Projekt

Das Miniman-Projekt der Universität Karlsruhe entwickelt den in Abb. 6 gezeigten intelligenten Mikroroboter mit fünf Freiheitsgraden und einer Größe von einigen Kubikzentimetern. Sein Aufgabengebiet ist der Umgang und die Montage von mechanischen Mikroteilen unter dem Lichtmikroskop oder im Vakuumraum eines Elektronenmikroskops, sowie das Greifen, Transportieren und Sortieren von biologischen Zellen unter einer wasserdichten optischen Linse. Um diese sehr unterschiedlichen Aufgaben in Echtzeit zu bewältigen, ist er mit Sicht-, Kraft- und Tastsensoren, sowie rechenstarker PC-kompatibler Hardware ausgestattet. [3] [4]

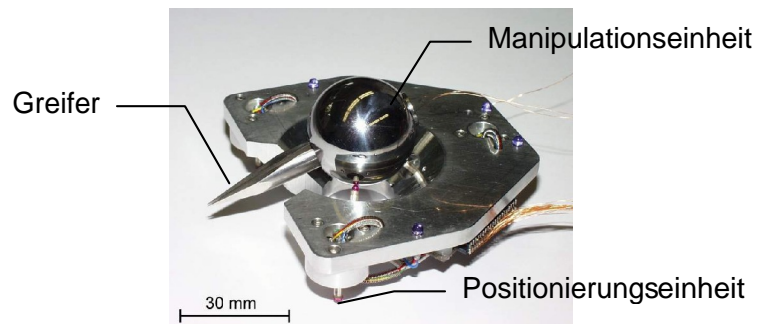


Abb. 6: Prototyp von Miniman III

4.2 Ein allgemeines Modell

Ein interessantes Konzept für ein Multagenten Robotersystem kommt aus Japan und wurde im Zuge des Forschungsprogramms „Micromaschine Technology“ entwickelt. Da es sehr allgemein gehalten ist, diente es als Vorlage für viele Ansätze aus der Mikrorobotik.

Ein solches System besteht aus vier Einheiten. Das Mutterschiff dient zum Transport, sowie zum Daten- und Energietransfer. Von hier aus wird eine Mikrokapsel mit eigener Energieversorgung zwecks Erkundung und Suche nach Defekten losgeschickt, die ihren Bericht an eine externe Kontrolleinheit schickt. Werden Beschädigungen festgestellt, übernimmt ein kabelloses Inspektionsmodul die präzise Analyse und sendet ebenfalls einen Bericht an die Kontrolleinheit. Zum Schluß übernimmt ein Operationsmodul, das über ein Daten- und Stromkabel an das Mutterschiff gekoppelt ist, die Reparatur bzw. die anfallende Arbeit.

Das Forschungsprogramm wurde 1991 gestartet und sollte die Entwicklung von sehr kleinen, intelligenten Robotersystemen zur medizinischen und industriellen Nutzung voran treiben.

[1]

5 Ansätze zur Fortbewegung

Es gibt sehr viele verschiedene z.T. rein experimentelle Antriebsformen, deshalb soll hier lediglich auf zwei sehr unterschiedliche Ansätze eingegangen werden.

5.1 Piezoelektrische Mikropositionierungseinheit

Dieser Ansatz nutzt die Eigenschaft der Längenänderung beim Anlegen einer Spannung an Piezoelemente, die Phänomene der Trägheit der Masse und der Reibung.

Das Fortbewegungsprinzip ist in Abb. 7 dargestellt. Das Piezoelement ist zwischen einem Positionierungselement und einem kleineren Gewicht befestigt. Durch Anlegen von Spannung an das Piezoelement, dehnt sich dieses sehr schnell aus und beschleunigt beide Gewichte in entgegengesetzte Richtungen. Da das Gewicht des Positionierungselements bei weitem dem der geringeren Masse überwiegt, überwiegt

ebenfalls die Beschleunigung des Antriebs in Richtung des Positionierungselements. Diese Bewegung in die gewünschte Richtung setzt sich selbst nach langsamem Abschalten der Spannung und dem damit verbundenen langsamen Zusammenziehen des Piezoelements noch fort und wird erst gestoppt, wenn die Reibung größer ist als die Restbeschleunigung.

Dieser Antrieb ist bereits kommerziell im Einsatz und für Serienfertigung geeignet. Er erreicht je nach Reibung eine Geschwindigkeit bis zu 5 mm/s bei einer Genauigkeit von 0,1 µm und einer ausübbarer Kraft von 13 N.

Eine solche Einheit kann auch waagrecht am Ende eines konventionellen Roboterarms oder einer anderen Positionierungseinheit zur Feinabstimmung eingesetzt werden.

Um einen volleinsatzfähigen Antrieb zu schaffen, sollte man mehrere solcher Einheiten einsetzen, da jede nur einen linearen Versatz ermöglicht. Abb. 9 zeigt eine mögliche Anordnung mit deren Hilfe man ein Werkstück schieben und drehen kann.

Mit einigen Änderungen, aber gleichem Prinzip kann man, wie in Abb. 8, auch einen Schwimmantrieb konstruieren. Durch schnelles Ein- und Ausschalten der am Piezoelement anliegenden Spannung vibriert die über ein Verbindungselement angeschlossene Flosse und erreicht somit bei einer Frequenz von maximal 350 Hz eine Geschwindigkeit von 30 mm/s.

[1]

Dies sind allerdings nur wenige Beispiele. Es existieren viele verschiedene Ansätze, die alle auf diesem Prinzip basieren. Auch Miniman verwendet Piezoaktuatoren zur Fortbewegung und Manipulation. Er erreicht eine Geschwindigkeit von drei Zentimetern pro Sekunde und eine Bewegungsauflösung von 10 nm [3].

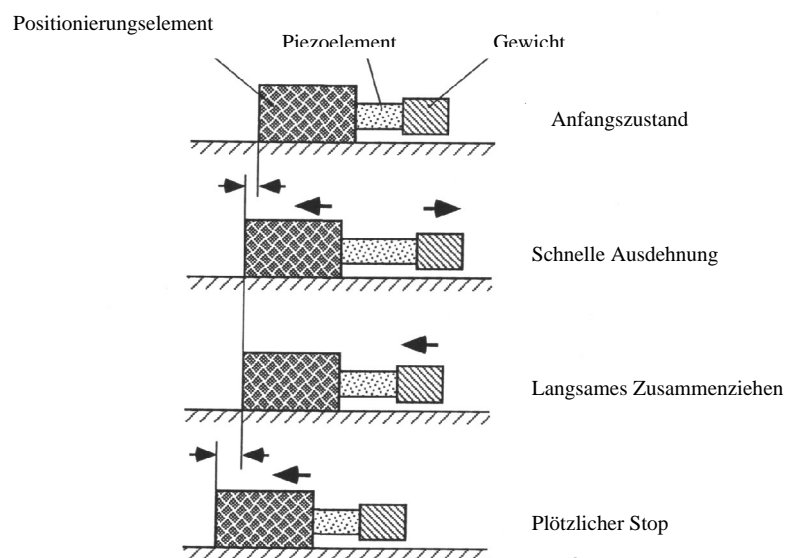


Abb. 7: Bewegungsprinzip einer piezoelektrischen Mikropositionierungseinheit

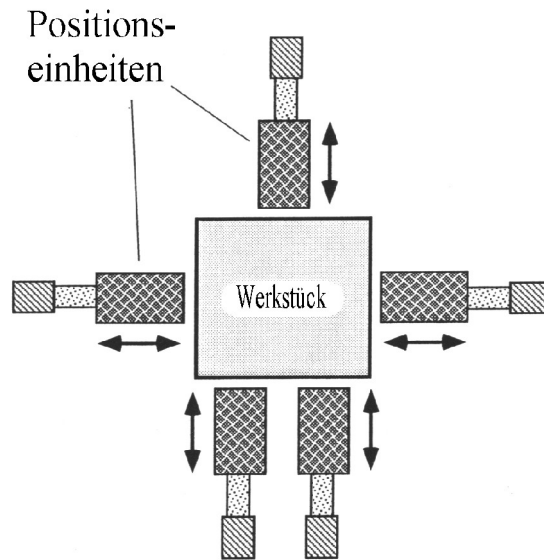


Abb. 8: Mögliche Anordnung mehrerer Piezoaktuatoren zur Mikropositionierung eines Werkstücks

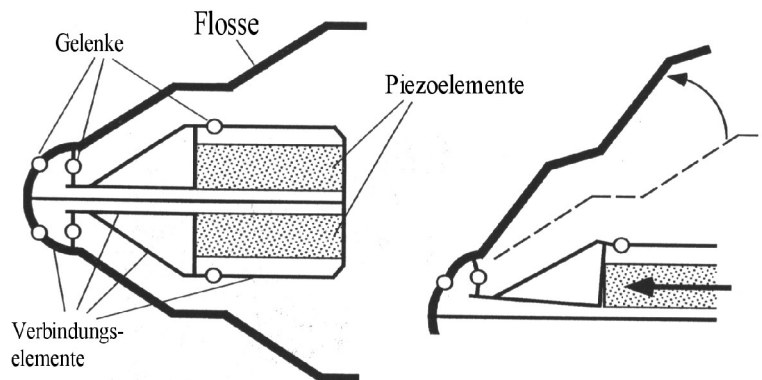


Abb. 9: Aufbau (links) und Prinzip (rechts) eines Schwimmroboters

6.2 Mikrokletterer

Eine komplett andere Idee kommt bei der Mikroklettermaschine zum Einsatz. Da sie mit Elektromagneten arbeitet, benötigt dieser Ansatz zwar einen ferromagnetischen Untergrund, kann dafür jedoch auch an Wänden und Decken entlang klettern.

Die Fortbewegungseinheit hat die Form eines Dreiecks und besteht aus zwei Beinen, wobei wie in Abb. 10 das äußere Bein das innere umschließt. Sie sind durch drei Piezoelemente verbunden, die mit einem flexiblen Gelenk an jeder Seite befestigt. Zusätzlich befindet sich in jeder Ecke des äußeren und in der Mitte des inneren Beins je ein Elektromagnet.

Das Fortbewegungsprinzip ist sehr einfach. Während die äußeren Elektromagneten eingeschaltet sind und so die Antriebsplattform auf dem Untergrund halten, schwebt das innere Bein frei über dem Untergrund und wird durch Zusammenwirken der Piezoelemente in die gewünschte Richtung verschoben. Durch Aktivieren des inneren und gleichzeitigen Lösen der äußeren Elektromagneten ist ein Schritt von ca. 5 μm bei einer Bewegungsauflösung von 10 nm getan.

Leider eignet sich dieser Antrieb nicht für Arbeiten unter einem Elektronenmikroskop, da die Bilder aufgrund der magnetischen Felder gravierend gestört werden.

[1]

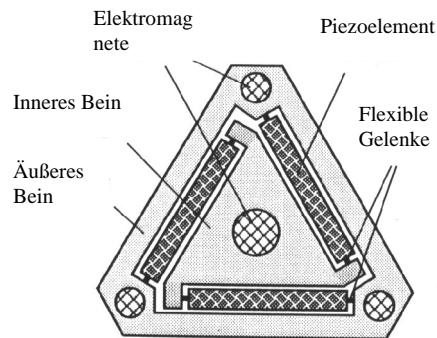


Abb. 10: Schematischer Aufbau einer Mikroklattermaschine mit Magneten

6.3 Mikromäuse und -insekten

Die Universität in Berkeley forscht bereits an einem autonom fliegenden mikromechanischen Insekt (MFI) mit einer Flügelspannweite von 11 mm. Abb.11 zeigt eine schematische Zeichnung der künstlichen Fliege.

Das Projekt ist in vier Stationen aufgeteilt:

- Durchführbarkeitsanalyse
- Konstruktion
- Aerodynamik und Flügelkontrolle
- Flugkontrolle und Integration

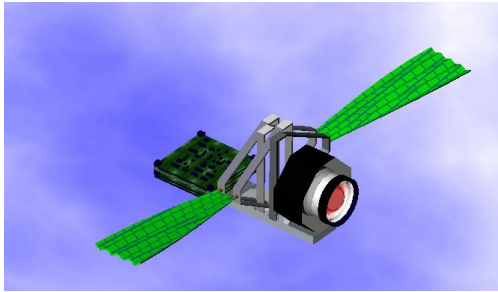
Als Vorbild dient die Analyse der Flugkünste der Schmeißfliege. Auch hier versorgen piezoelektrische Aktuatoren an einem flexiblen Brustkorb die Flügel Schlag für Schlag mit der nötigen Kraft.

Die Aktuatorenmasse kann verglichen zu einer biologischen Fliege wesentlich reduziert werden, da Piezoaktuatoren eine größere Kraft entwickeln als Muskeln. Die so generierte Kraft ist jedoch unruhig und komplex zu berechnen, weshalb man sich hier hauptsächlich auf empirische Testdaten verlassen muss. Auf gleichem Weg müssen alle Designeigenschaften getestet und optimiert werden. Tab. 1 enthält die wichtigsten Eckdaten die als Vorbild für das MFI dienen.

Im nächsten Schritt muss eine ausreichende Energiequelle, sowie eine Flugkontroll- und eine Kommunikationseinheit entwickelt werden. Das größte Problem ist hierbei die Energiequelle, da die bisher verwendete Batterie einfach zu schwer ist. Eine Lösung ist jetzt möglicherweise mit Hilfe von Solarzellen gefunden.

Erstes Ziel ist der stabile Flug mit einfachen optischen Sensoren und einem rudimentären Gyroskop um das Flugverhalten von Fliegen zu imitieren. Autonomie ist erst als zweites Ziel geplant.

[22]



<u>Parameter</u>	<u>Schmeißfliege</u>
Gesamtgewicht	$100 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$
Aktuatorgewicht	ca. $50 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$
Flügelspannweite	11 mm
Flugleistung	ca. 4 mW
Aktuatorleistung	ca. 8 mW
Flügelgewicht	10^{-6} kg
Flügelträgheit	$20 \cdot 10^{-12} \text{ kgm}^2$
Gelenksteifigkeit	ca. $2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm rad}^{-1}$
Resonanzfrequenz	150 Hz
Flügeldämpfung	ca. 10^{-8} Nms

Abb. 11: Schematische Skizze des MFI Tab. 1: Eckdaten für das MFI

Doch das ist bei weitem nicht der einzige Ansatz, der die Natur kopiert. Beispielsweise fördert das US-Militär die Entwicklung miniaturisierter Aufklärer und so wurde nicht nur Mikromäuse, sondern auch Mikrokäfer ihren Vorbildern nachempfunden. Laut Guinness Buch der Rekorde heißt der kleinste Roboter der Welt „Monsieur Epson“ und ist eine Robotermaus, die im Heinz Nixdorf Museumsforum zu besichtigen ist. [23]

Mikromäuse in verschiedenen Größen stellen ihr Können jährlich im sog. „Mikromouse Maze Contest“ in London unter Beweis. Mikromäuse sind dabei definiert als kleine, Mikroprozessor gesteuerte Fahrzeuge, die mit Hilfe von anpassungsfähiger Intelligenz, ihren Weg durch ein unbekanntes und unzusammenhängendes Labyrinth finden. Sowohl für das Labyrinth, als auch für die Mäuse gelten strenge Regeln. In Abb. 12 zeigt eine Mikromouse im Sinne des Wettbewerbs. Die kleinsten Teilnehmer sind dabei ca. ein Quadratzentimeter groß. Es zählen sowohl die Zeit von Start bis Ziel, sowie der Grad der Exploration. Allerdings ist die Zeit auf 10 Minuten begrenzt. [5]

Der Mauskontroller muss dabei die folgenden Aufgaben bewältigen:

- Kontrolle der Sensoren und Ertasten der Umwelt
- Aufbauen einer Karte der Umgebung
- Wegplanung für eine kollisionsfreie Navigation durch das Labyrinth
- Steuern des Motors auf der geplanten Trajektorie
- Feststellen und Korrigieren von Navigationsfehlern

[24]

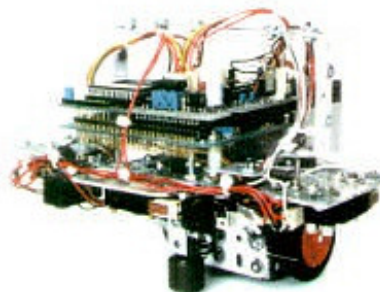


Abb. 12: Mikromouse im Sinne des Micromouse Maze Contest

Der Roboterkäfer hat vier fünfgliedrige Beine und wird mit Piezoaktuatoren angetrieben, die ebenfalls die natürliche Fortbewegung des Käfers nachahmen. Während sich das rechte Vorder- und das linke Hinterbein senken, hebt der Käfer das andere Beinpaar. Die Bewegung der Beinpaare ist um 90° phasenverschoben. Dabei ist die Resonanzfrequenz der rechten und der linken Beine verschiebbar. Verschiebt man die Antriebsfrequenz in Richtung der Resonanzfrequenz, macht der Käfer auf der entsprechenden Seite größere Schritte und läuft eine Kurve. Der Käfer hat eine Grundfläche von 9×12 Zentimetern und kann eine Nutzlast von 50 Gramm tragen, was in etwa seinem eigenen Körpergewicht entspricht. [23]

Weiterentwickelte Kleinstroboter sollen so von Soldaten im Gepäck mitgeführt werden und bei Bedarf zwecks Exploration ausgesetzt werden. Sie werden mit unterschiedlichen Energiequellen ausgerüstet z.B. Batterie, Benzin, Elektromotor etc. Es muss nun lediglich für jeden Robotertyp ein passender Antrieb ausgewählt werden. [23]

6 Ansätze zur Manipulation

Es gibt viele verschiedene Arten von Manipulation, aber die grundlegenden Aufgaben greifen, transportieren und positionieren müssen von jedem Mikrosystem beherrscht werden. Oft werden dazu wegen der hohen Empfindlichkeit der Objekte spezielle Arbeitsbereiche mit Luftreinigern, Klimaanlage und Stoßdämpfung benötigt.

Je kleiner die zu behandelnden Objekte werden, desto genauer muss das System arbeiten. Dabei ist es v.a. wichtig auf die entsprechenden Toleranzen zu achten, da Einflüsse wie Hitzeausdehnung, Steuerfehler und Reibung eine viel größere Rolle spielen als in der Makrowelt.

6.1 Greifer

Es gab schon viele Versuche eine komplette menschliche Hand nachzubilden. Da diese jedoch sehr komplex ist und für viele Anwendungsfälle auch ein einfacherer Greifer mit ähnlichen Fähigkeiten ausreicht, entwickelte das Mechanical Engineering Laboratory (MEL) in Japan eine Mikrohand mit zwei Fingern (siehe Abb. 13). Sie besitzt sechs Freiheitsgrade mit paralleler Kinematik und arbeitet nach dem sog. „Chopstick Prinzip“, d.h. das Greifen funktioniert wie bei chinesischen Essstäbchen. Auch Miniman hat einen solchen zwei-fingrigen Greifer [16].

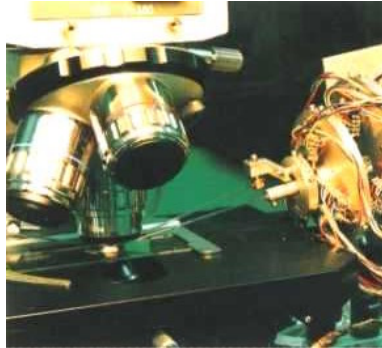
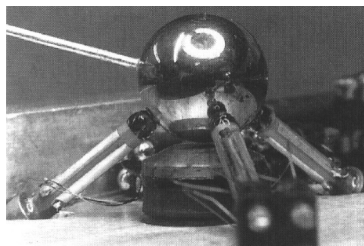


Abb. 13: Zwei-fingrige Mikrohand für Mikromanipulation

Das Problem hierbei ist den von den Fingern ausgeübten Druck gering genug zu halten, da Mikroteile sehr empfindlich sind und deswegen auch in der Makrowelt vernachlässigbare Kräfte einen großen Einfluss haben. So spielt die Anziehungskraft zwischen Greifer und Bauteil eine große Rolle, weil sie in diesen Dimensionen vergleichbare Größenordnungen wie die Erdanziehung erreichen kann. Es kann also zum Problem werden einen Mikrogegenstand wieder abzusetzen ohne ihn dabei zu beschädigen.

Andererseits existieren auch mehrere Ansätze die gerade diese winzigen Kräfte ausnutzen und Gegenstände beispielsweise mittels elektrostatischer Aufladung oder durch einfaches befeuchten an sich binden. Beispielsweise wird speziell das Kapillarphänomen von einem von Minimans Greifern, einer Mikroglaspipette, ausgenutzt. Bei 80 bis 100 μm Durchmesser und einem Arbeitsdruck 0,5 bis 1 bar erzielt man die besten Ergebnisse, wenn die Öffnung der Pipette etwa der Größe des Objekts entspricht [19].



Oft werden die Greifer sogar der Form der zu transportierenden Objekte angepasst, was allerdings die Flexibilität sehr einschränkt. Da solche Einschränkungen die Kontrolle jedoch sehr vereinfachen, stattet man viele Mikroroboter, u.a. auch Miniman, mit austauschbaren Greifern aus [1]. Wie bei Miniman kann dann ein Stahlball (Abb. 14) als universelle Manipulationseinheit eingesetzt werden, um eine möglichst uneingeschränkte, einfache Bewegung für die einzelnen Aktuatoren zu gewährleisten. [4]

Abb 14: Minimans Manipulationseinheit: ein Stahlball

6.2 Teleoperation

Da die menschliche Hand zwar sehr geschickt ist, aber zu grob für den Umgang mit Mikroteilen, müssen viele Operationen durch einen Roboter anstatt eines Mensch durchgeführt werden. Dieser wird von einem menschlichen Benutzer geleitet bzw. ferngesteuert. Er repräsentiert die rechte und linke Hand des Operators, jede mit einer grob und einer Feinabstimmung ausgerüstet. So kann er für den Menschen gefährliche oder unzugängliche Arbeiten, wie die Wartung von Kernreaktoren oder Ölpipelines, erledigen. Wegen ihrer Präzision werden sie auch häufig in der Medizin eingesetzt.

Teleoperation basiert auf dem schnellen Fortschritt von Kommunikation und Informationstechnik und wird deswegen auch gleichzeitig durch die Kapazität der Informationsübertragung begrenzt [19]. Darüber hinaus erfordert sie zwei Voraussetzungen: Der Prozess muss für den Operator beobachtbar sein und die Prozessinformationen müssen ihm möglichst realistisch vermittelt werden. Dazu werden meist verschiedene Sinne gleichzeitig angesprochen. Da der Mensch auf akustische Signale schneller reagieren kann als auf visuelle, wird der Prozess nicht nur aus verschiedenen Kamerapositionen gefilmt, sondern auch in Geräusche umgesetzt. So eignet sich bsp. Lautstärke hervorragend als Maß proportional zum ausgeübten Druck. Weiterhin wird durch den Joystick ein Feedback der wirkenden Kräfte zurückgegeben. Abb. 15 zeigt ein allgemeines Modell für Teleoperation, dass so auch den Menschen in die Lage versetzt mit Objekten von ein paar wenigen Mikrometern Größe umzugehen. Allerdings wäre eine effizientere Nutzung der Übertragungskapazität möglich, wenn ein günstigeres Verhältnis zwischen Kontrollinformationen und Graphikdarstellung erreicht werden könnte [1].

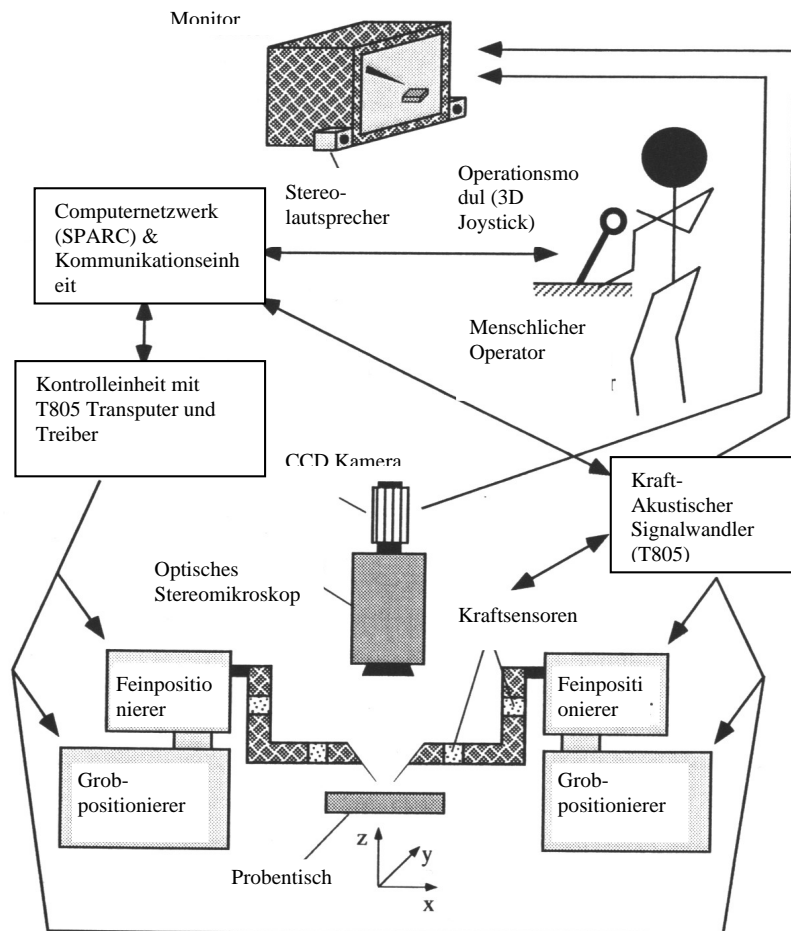


Abb. 15: Allgemeines Modell für Teleoperation

Eines der interessantesten Anwendungsgebiete ist dabei die sog. „Minimally Invasive Surgery“ (MIS), die schwierige Operationen durch minimale Einschnitte und somit eine weniger traumatische Behandlung des Patienten erlaubt. In diesem Zusammenhang entwickelte Akhil Madhani am MIT-Labor für künstliche Intelligenz den „black falcon“, ein teleoperierendes chirurgisches Instrument, das eine Bypassoperation durch einen kleinen Einschnitt zwischen den Rippen vornimmt [15].

6.4 Automated Desktop Station

Um automatisierte Mikromontageanlagen zu entwickeln, setzt man fließbandartig mehrere Mikroroboter ein, die je für eine bestimmte Teilaufgabe zuständig sind. Eine übergeordnete stationäre Kontrolleinheit arbeitet eine Strategie aus, übernimmt die Feinplanung und überwacht die Ausführung, wobei zu jedem Zeitpunkt ein menschlicher Operator eingreifen kann. Allerdings werden dazu teure, hochauflösenden Sensoren benötigt, weil die auftretenden Kräfte, Bewegungen und Teile sehr klein sind. Zur Beobachtung dient ein Licht- oder Elektronenmikroskop. Eine effiziente Planung,

bei der alle physikalischen Aspekte und Beschränkungen berücksichtigt werden, sowie ein montagefreundliches Design sind hierbei v.a. für eine günstige Massenproduktion wichtig. Die kollisionsfreie Wegplanung einerseits und die gleichzeitige Manipulation durch mehrere Roboter andererseits sind besonders schwierig, da viele verschiedene Kräfte und dynamische Objekte beteiligt sind. Aus dem gleichen Grund scheidet in fast allen Fällen die Teleoperation aus. Dynamische Montageplanung erfordert daher meist eine Simulation. Zur Vereinfachung bezieht sich die Wegplanung daher auf das zu behandelnde Objekt und nicht auf die einzelnen Individuen [1].

Ein Beispiel für solch eine Anlage ist das „Robot Credit Card System“ in Abb. 16. Es dient zur Montage und zum Testen von mechanischen oder elektrischen Komponenten kleiner als ein Millimeter. Auch hier hatte man beim Transport Probleme mit der Reibung. Doch diese wurde umgangen indem man mit Hilfe von Luft oder bestimmten Flüssigkeiten einen Gleitfilm zwischen den Robotern und dem Operationstisch schafft.

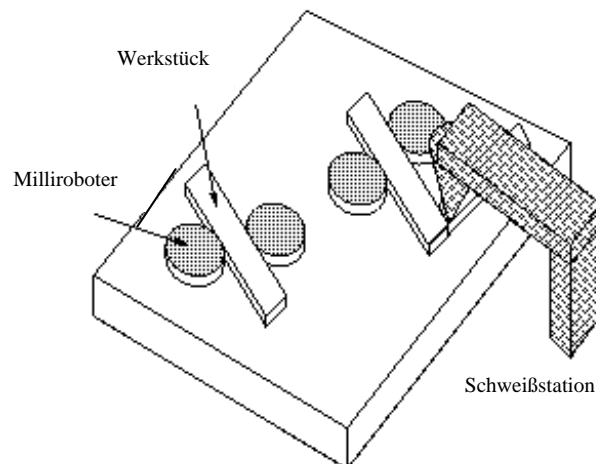


Abb. 16: Credit Card Robot System

Die Position der Roboter und der Werkstücke wird mit Kapazitätsmessungen ermittelt. Dazu ist ein entsprechendes Sensorfeld zusammen mit einer Platte aus magnetisierbaren Feldern in die Arbeitsplattform integriert. Eine nahezu reibungsfreie Fortbewegung der Roboter wird nun durch Aktivieren der entsprechend vorherberechneten Magnetfelder erreicht. Der Aufbau der Arbeitsplatte und die Wegplanung sind noch einmal schematisch in Abb. 17 dargestellt.

[1] [21]

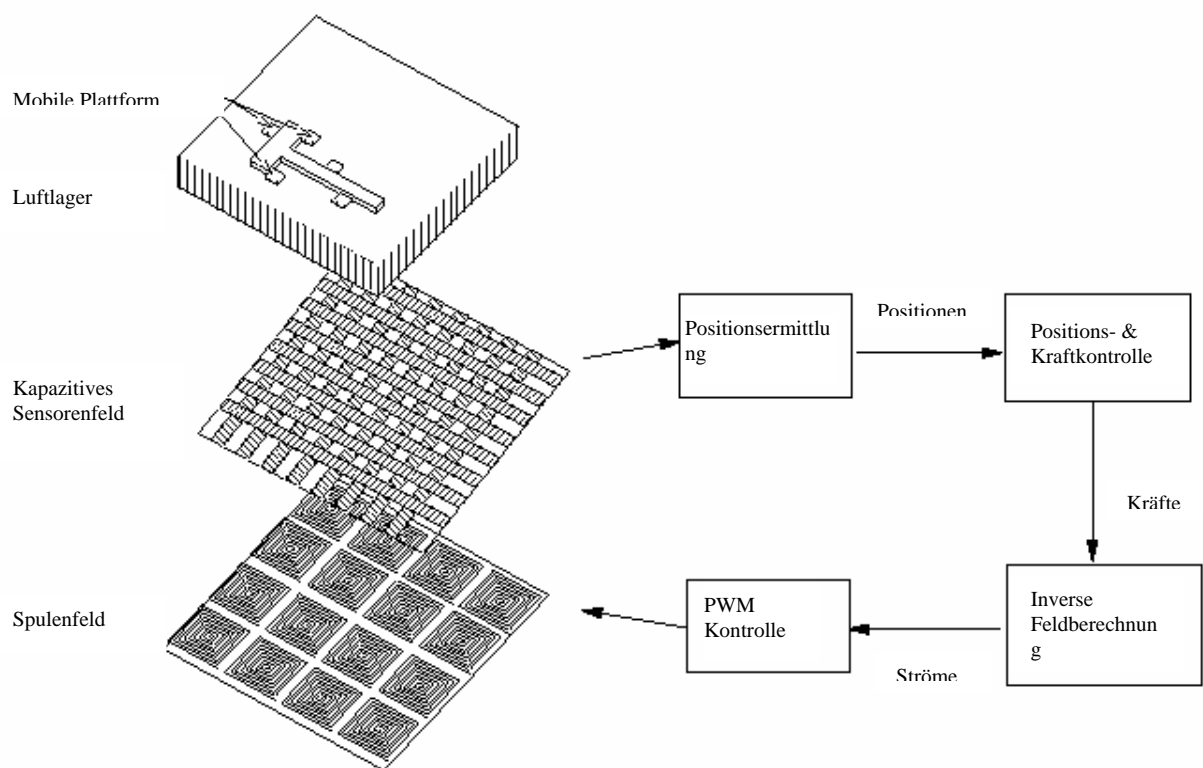


Abb. 17: Aufbau der Arbeitsplattform und Wegplanung des Credit Card Robot Systems

Dieser Effekt des reibungsfreien Transports vereinfacht die Manipulation von Mikroteile durch Mikroroboter enorm, da durch kontrolliertes aktives Schieben das Tragen und Heben der Teile entfällt. Desweiteren erfordert ein Transport dieser Art nur Zugang zu einer Seite des Objekts. Die Mikroroboter sind dazu mit einem Berührungs- und Kraftsensor ausgestattet um das Objekt mit einem gleichmäßigen Druck vor sich herzuschieben während es einen gleichmäßigen Kontakt zur Oberfläche hält. Auf diese Weise kann ein Kontaktverlust sofort festgestellt und gemeldet werden. [20]

6.5 Kooperation: Die Ameisenkolonie

Um die Arbeit eines Mikroroboters noch effizienter zu gestalten, arbeitet man schon lange an Modellen für kooperierende Roboter, die als Team Informationen teilen und Handlungen koordinieren. So kann das Team Erfolg haben selbst wenn einzelne Roboter ausfallen oder Fehler machen. Dies ist besonders wichtig für gefährliche wissenschaftliche oder militärische Aufgaben.

Der erste Kooperationsansatz war die Arbeitsteilung zwischen Manipulation und Überwachung. Bei einem weiteren Ansatz, stand der Mensch Modell. Er empfand die linke und die rechte Hand nach, wobei eine das Werkstück hielt, während die andere es bearbeitete.

James McLurkin gelang es viel später auf der Basis von Maschinenbau, Informatik und dem Wissen über das Sozialverhalten realer Ameisenkolonien eine Gemeinschaft von kooperierenden Mikroroboter zu entwickeln.

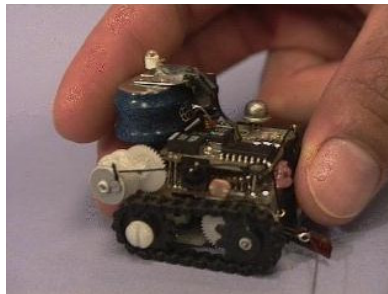


Abb. 18: Eine von Lurkins Roboterameisen

Abb. 18 zeigt eine dieser intelligenten Roboterameisen, die auf einer Größe von einem Kubicinch einen winzigen Computer, drei Miniaturmotoren und insgesamt 14 Sensoren vereinen. (Darunter befinden sich vier Lichtsensoren, vier Infrarotempfänger, Stoß-, Lage- und Futtersensoren.) Der schematische Aufbau ist in Abb. 19 dargestellt. Die Ameisen, die am MIT Labor für künstliche Intelligenz konstruiert wurden, kommunizieren über Infrarotempfänger und können so einem Anführer folgen oder Eroberer-die-Flagge und Fangen, sowohl mit einem Fänger als auch in Teams, spielen.

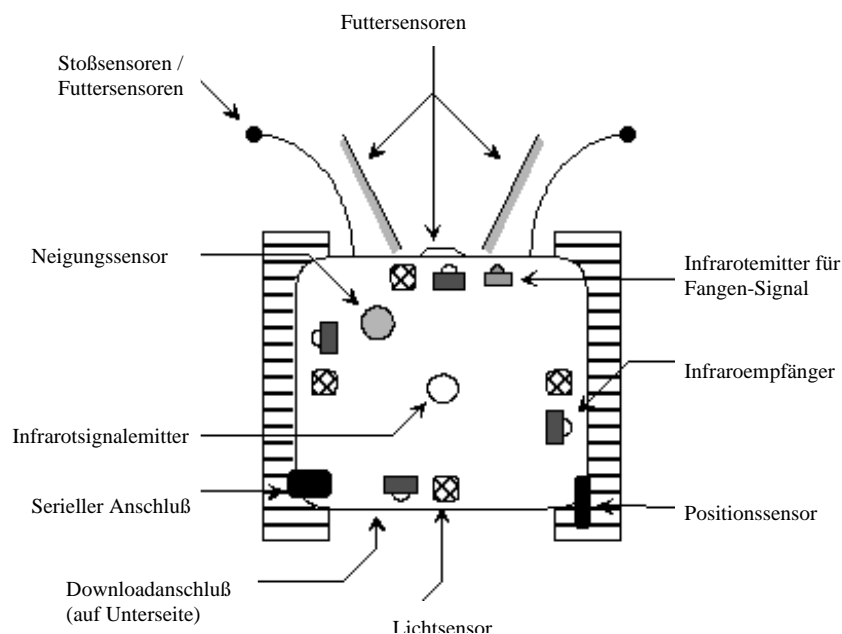


Abb. 19: Schematischer Aufbau einer intelligenten Ameise

Sie leben sogar in einer eigenen Kolonie. Doch sie brauchen elektrisch leitende Nahrung auf einem leitenden Untergrund um arbeiten zu können. Künftige Versionen sollen jedoch mit magnetischem Futter auskommen, d.h. es würde keine spezielle Oberfläche mehr benötigt. Findet eine Ameise Futter, gibt sie das „Sehe Futter“-Signal an alle Ameisen in ihrer Umgebung weiter, die wiederum ein „Sehe Ameise mit

Futter“-Signal weitergeben usw. Auf diesem Weg können große Futterquellen optimal ausgeschöpft werden.

Die Software ist in viele kleine Teilprogramme, sog. Verhaltensebenen, unterteilt, wobei jedes Verhalten für einige Sensoren zuständig ist. Jedes sendet eigene Kommandos an die Motoren, die sich jedoch leicht widersprechen können. Deshalb sind die Unterprogramme durch eine Prioritätenregelung in der Lage die Befehle von Programmen niedriger Priorität zu überschreiben. Die Verhaltenshierarchie selbst ist situationsabhängig. Auf diese Weise ist es möglich es echte Ameisenkolonie zu simulieren.

[14] [17] [18]

7 Leistungsfähigkeit und Probleme

Zur Konstruktion von Mikrosystemen unterscheidet man den Top-down- und den Bottom-up-Ansatz. Top-Down bedeutet hierbei, dass man bereits etablierte Verfahren weiterentwickelt, um sie in immer kleinere Dimensionen zu verfeinern. Diese Methode stellt zwar den Großteil der Forschungsarbeiten für komplexe Mikrobauteile, führt aber nicht immer zum Ziel, da verschiedene Beschränkungen durch den Roboter und die benutzten Werkzeuge die Flexibilität und den Automatisierungsgrad vorgeben. Im Gegensatz hierzu versucht der Bottom-Up-Ansatz aus einzelnen Atomen immer komplexere Gebilde zusammenzusetzen. In vielen Fällen ist dieser Zugang lediglich auf Computersimulation beschränkt, da man über einzelne Atome noch keine absolute Kontrolle hat. Um eine möglichst optimale Lösung zu erreichen, versucht man deswegen in vielen Fällen einen Weg zu finden, bei dem sich beide Ansätze in der Mitte treffen.

Die heutigen Vorstöße in die Nanotechnologie wurden erst möglich durch die Erfindung des Rastertunnelmikroskops (RTM), das auf dem sog. Tunneleffekt beruht. Die feine Spitze des Mikroskops senkt sich so dicht über die Oberfläche des Objekts, dass eine elektrische Spannung für die Überbrückung des geringen Abstands sorgt. Diese Erfindung wurde 1996 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Es kann einzelne Moleküle mit der Spitze aufnehmen und sie an anderer Stelle wieder ablegen. Leider ist seine Tätigkeit auf elektrisch leitende Materialien beschränkt. Doch auch dieses Problem wurde mittlerweile gelöst.

Ein weiteres großes Problem ist das Erzeugen der nötigen Leistung in solch kleinen Dimensionen. Dabei dürfen die Schaltelemente weit weniger Energie verbrauchen als heute möglich, da selbst bei Abgabe der minimalen thermischen Energie kT scheitern viele Lösungsideen an der großen Hitzeentwicklung. Das Problem ist also die Reduktion der benötigten Energie. Theoretisch läßt sich dieses mittels sog. reversibler Logik lösen, jedoch fehlen bis heute die praktischen Möglichkeiten. Bei reversibler Logik handelt es sich um ein Rechenprinzip, bei dem aus dem Ergebnis die ursprüngliche Rechenoperation ermittelt werden kann. Als Beispiel berechnen wir „A und B“, wobei A und B logische Ausdrücke mit $A = \text{falsch}$ und $B = \text{wahr}$ sind. Das Ergebnis von „A und B“ ist falsch, aber wir können an dem Ergebnis nicht erkennen, ob

z.B. A und B falsch waren. Durch reversible Logik ist dann möglich, die Ausgangsbelegung festzustellen, also A = falsch und B = wahr. Zur Zeit ist die einzige Möglichkeit, reversible Logik zu implementieren, die Rechenschritte aufzuzeichnen. Dies ist sehr aufwendig, so dass hier noch intensiv geforscht werden muss.
[6]

Aktuelle Beispiele für Nanorobotik nutzen bereits neue Ansätze aus der Biochemie. Fullerene gelten dabei als eine der vielversprechendsten Errungenschaften auf diesem Gebiet. Es sind Nanokohlenstoffröhren, die enorm elastisch und sogar stabiler als Stahl sind. Dazu kommt, dass sie, je nach Beschaffenheit, als extrem gute Leiter, Transistoren, Gleichrichter oder gar als Zahnräder dienen. Sie wurden 1991 zum ersten Mal von Iijima synthetisiert. Erst vor Kurzem gelang es Wissenschaftlern diese Nanoröhrchen zu einer Faser zusammen zu fügen und eine elektrische Spannung anzulegen, die die Faser wie einen Muskel auf und ab wippen lässt. Allerdings ist an Masseneinsatz noch nicht zu denken, da Herstellungsmethoden mit der nötigen Zuverlässigkeit fehlen. [6] [11] [12]

Durch eine weitere Antriebsmöglichkeit wird ein Nanomotorboot 40 Minuten lang fortbewegt. Ringförmige Eiweißstrukturen wandeln Adenosintriphosphat (ATP) zu Adenosindiphosphat (ADP) um und gewinnen somit nicht nur Energie für biochemische Zellprozesse, sondern dienen ebenfalls als molekulare Propeller. Wissenschaftlern in Cornell gelang es diese Eigenschaft zum Bau eines molekularen Motors zu nutzen und diesen an einem mikrostrukturierten metallischen Gegenstand zu befestigen. Der Propeller dreht sich mit bis zu vier Umdrehungen pro Sekunde. [6] [11]

In der Biotechnik ist man heute bereits soweit, dass man bestimmte Defekte mit Hilfe der vier verschiedenen Basen, aus denen die DNA besteht, entdecken kann. Mikro-U-Boote sollen so mit Hilfe von Biotechnik Gendefekte aufspüren und Krankheiten selbständig bekämpfen. Sie operieren nach dem sog. Schlüssel-Loch-Prinzip, d.h. zu jedem Molekül existiert genau ein dazu passendes Gegenstück, an dem das Nanoteil andockt. Durch das Andocken wird nun die entsprechende Reaktion, z.B. das Öffnen einer Kammer, hervorgerufen. So können wichtige Medikamente viel effektiver eingesetzt werden, da sie direkt vor Ort wirken können.

Nach diesem Prinzip arbeitet auch der in Abb. 20 dargestellte Nanorob. Er wurde von IBM in Zusammenarbeit mit der Universität Basel entwickelt und besteht aus einem Trägermodul an dessen Seiten Zinken herausgeätzt wurden. Auf den Zinken werden bestimmte Eiweißmoleküle als Botenstoffe aufgebracht, die von den Krebszellen angelockt werden (Abb. 21 links). Beim Andocken an die Krebszelle werden die Zinken heruntergedrückt, das Medikament wird freigesetzt (Abb. 21 Mitte) und vernichtet die Krebszelle (Abb. 21 rechts).

Das größte Problem hierbei ist die Überwindung des menschlichen Immunsystems, das jeden Fremdkörper sofort angreift und neutralisiert. [10] [11] [12] [13]

Allerdings liegt ein einsatzfähiges Mikro-U-Boot noch nicht in naher Zukunft, da noch nicht alle Auswirkungen unter Belastung erforscht sind. Man ist zwar bereits in der Lage das U-Boot herzustellen, aber die Technik im Rumpf müsste Nanoformat haben,

für dessen Herstellung man bis heute noch keine passenden Lösungen gefunden hat [12].

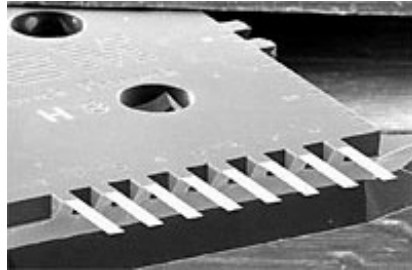


Abb. 20: Nanorob unter einem Elektronenmikroskop

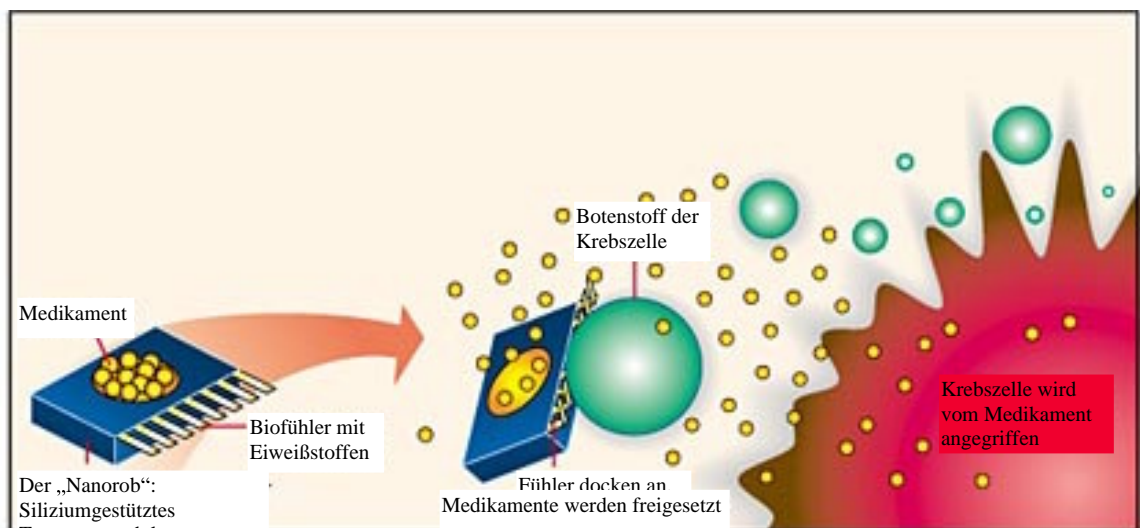


Abb. 21: Schema eines Einsatzes von Nanorob

Schon früher konnte man starre Konstruktionen aus DNA-Molekülen zusammensetzen, aber Anfang des Jahres war es zu ersten Mal möglich einen beweglichen Roboterarm in Nanodimensionen zu kreieren, der sich selbst regeneriert. Doch bei allen Vorteilen von biochemischen Operationen sind diese langsam und ihre Fehlerrate steigt exponentiell mit der Anzahl der Reaktionen. [6] [9]

8 Ausblick

Das hohe Potential das Mikro- und Nanorobotik v.a. in Verbindung mit Biotechnik vorhergesagt wird, wurde von Experten der Foresight Konferenz mit vorsichtigen Zahlen belegt. So prophezeit man für 2040 den ersten Nanocomputer, wobei die Siliziumindustrie gemäß Moorschem Gesetz bereits 2010 in die Nanodimensionen vorstoßen soll. In Verbindung mit Molekularbiologie, die immer größere Moleküle für verschiedenste Anwendungen zusammensetzt, werden in ca. 50 Jahren erste Produkte zur Marktreife kommen. Im Jahr 1999 stieg der Forschungsetat für Nanotechnologie um 25%. [6]

Durch die vielen neuen Anwendungsgebiete, die sich mit Hilfe von Mikrotechnologie erschließen lassen, wird in Zukunft unser tägliches Leben noch mehr von Technik beeinflusst sein. Unsere medizinische Versorgung wird weiter verbessert, da beispielsweise bei Operationen nur noch minimale Einschnitte benötigt werden und ein Roboter das natürliche Zittern der menschlichen Hand ausgleichen kann und so Schnitte wesentlich präziser vornehmen kann. Mini-U-Boote sollen künftig bei der Diagnose, der ständigen Überwachung und sogar der Bekämpfung von Diabetes, Krebs und sonstigen Krankheiten helfen. Sie können Medikamente in kürzester Zeit an jede Stelle in unserem Körper transportieren und dort effektiv einsetzen. [1]

Ein weiteres Forschungsziel ist es kleinste Roboter zu kreieren, die Mikro- und Nanoobjekte schnell nachbauen können [6]. So werden sie in der Lage sein, sich, ähnlich wie Viren, selbst zu reproduzieren [12]. Künftige Ziele bestehen aber auch darin konventionelle Methoden durch bessere, einfache Kontrollalgorithmen und schnellere, einfachere Kommunikation zu verbessern. [1]

In vielen Fällen entsteht jedoch eine Kluft zwischen den benötigten oder gewünschten Eigenschaften und dem Machbaren, die es möglichst zu schließen gilt. Zwar haben viele Forschungsansätze und Projekte noch keine Aussicht auf kurzfristige Marktchancen, aber durch neue Erkenntnisse und wachsendes Verständnis bereiten sie den Weg für die nachfolgende, stark expandierende Industrie. Wichtig für einen breiten Markt, hohe Qualität und sinkende Preise ist hierbei die Entwicklung von Standards, die eine automatisierte Massenproduktion und flexiblen Einsatz gewährleisten. [6]

9 Literatur

- [1] Sergej Fatikow, Ulrich Rembold: Microsystem Technology and Microrobotics. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1997.
- [2] Mikromontage Arbeitsinhalt, PAK Kaiserslautern, <http://www.uni-kl.de/pak/montage/inhalt.html>
- [3] Minimanhomepage, Universität Karlsruhe <http://www.wipr.ira.uka.de/miniman/>
- [4] Miniman: Public Annual Report No. 1, Esprit-Project No 33915, November 1998 – October 1999
- [5] C.Kanesalingam, Introduction to Micromouse, University of East London <http://www.uel.ac.uk:80/pers/C.Kanesalingam/miceintr.htm>
- [6] Jürgen Rink Jr.: Meisterhafte Kleinarbeit Nanotechnologie – die industrielle Revolution des 21. Jahrhunderts? C't 21/98
- [7] Parallelroboter, <http://www.stp-news.de/Archiv/>

- [8] Parallelroboter – Geschichte
<http://www.tu-bs.de/institute/ifh/forschung/parallelroboter/>
- [9] Erster Roboter aus DNA-Strängen, Welt am Sonntag, Zeitgeschehen – Medizin, Nr.3 vom 17.1.1999, Axel Springer Verlag AG
- [10] Mini-Maschine spürt Genschäden auf, Die Welt, Wissenschaft, Nr.90 vom 15.4.00, Axel Springer Verlag AG
- [11] Dr. Wolfgang Stieler: U-Boote im Bauch, c't 10/00, Heise Verlag
- [12] Gerald Traufetter: Tauchen im Nanokosmos, Der Spiegel 16/00, Medizintechnik 1. Medizin von morgen 1.2.Rettung durch Robodocs – Fortschritte der Medizintechnik, Spiegel Verlag
- [13] Wolfgang Kempf: Er kann die gesamte Medizin verändern, Bild Online – Aktuell, 14.4.00,
<http://www.bild.de/service/archiv/2000/apr/14/aktuell/krebs/krebs.html>
- [14] Robot Ants, <http://www.ai.mit.edu/projects/ants/>
- [15] Lemelson-MIT Award For Robotic Invention,
<http://inventors.about.com/education/inventors/library/weekly/aa980211.htm>
- [16] Main Results in Recent Years (11-15), Chopstick Principle
<http://www.mel.go.jp/soshiki/tokatsu/1999youran/1999saikin/saikin-11-15-e.html>
- [17] James McLurkin (1973-) Robot Ants,
<http://inventors.about.com/education/inventors/gi/dynamic/offsite.htm?site=http://web.mit.edu/invent/www/inventorsI%2DQ/mclurkin.html>
- [18] Explosive Ordnance Disposal Robots at the MIT Artificial Intelligence Laboratory, <http://alpha-bits.ai.mit.edu/projects/eod-robots/>
- [19] MEL, Research, Robotics, <http://www.mel.go.jp/3.html>
- [20] Manipulation of Microparts Using Force Controlled Pushing,
<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~zesch/project/microPush.html>
- [21] Microrobotics and Millirobotics Research, Credit Card Robot System,
<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~ronf/milli-robot.html>
- [22] Micromechanical Flying Insect,
<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~ronf/mfi.html>

- [23] Dr. Wolfgang Stielor: Käfer und Fliegen, Mechatronische Insekten als Aufklärer und Spione, c't 11/2000
- [24] C.Kanesalingam, Design and Development of a Micromouse, University of East London
<http://www.uel.ac.uk/pers/C.Kanesalingam/kanesh.htm>