

Mikrosystemtechnik fürs Militär

Welche Gefahren bergen Implantate und Kleinroboter, wenn sie militärisch genutzt werden, und wie lässt sich einem Missbrauch vorbeugen?

Jürgen Altmann

Technische Anwendungen, die aus der physikalischen Forschung hervorgehen, bringen oft Nutzen, aber sie können auch Gefahren bergen. Eine Möglichkeit, solchen Risiken konstruktiv zu begegnen, besteht darin, sie in der eigenen wissenschaftlichen Arbeit ebenfalls zum Forschungsgegenstand machen. Dabei treten zu naturwissenschaftlichen verstärkt interdisziplinäre Aspekte.

Die Mikrosystemtechnik (MST) befasst sich mit künstlichen Systemen der Größe 0,1 bis einige 100 Mikrometer. Die Produktionsprozesse ähneln oft denen der Mikroelektronik (Lithografie, Ätzen, Aufdampfen usw.), jedoch mit zusätzlicher Strukturierung für bewegliche Teile oder Fluidkanäle [1]. Auf einem Siliziumwafer lassen sich dabei elektronische Schaltungen gleich mit erzeugen, und parallele Produktion vieler Systeme erlaubt niedrige Einzelkosten. Aber auch mechanische, chemische, elektrische u. a. Verfahren werden zum Ab- oder Auftragen von Material auf der Mikroskala benutzt. MST wird für Sensoren und Aktoren verwendet, auf Grund mechanischer, elektrischer, optischer, chemischer, biologischer u. a. Wirkprinzipien. Seit vielen Jahren ist MST ein Schwerpunkt staatlicher Förderung von Forschung und Entwicklung (FuE). Gegenwärtig sind die umfangreichsten Anwendungen Schreib-/Leseköpfe in Festplatten, Tintenstrahldruckköpfe, Herzschrittmacher. Starkes Wachstum wird vorausgesehen in den Bereichen Informationsverarbeitung, Bio-Medizin [2], Auto [3], Haushalt, Telekommunikation; der Weltmarkt soll sich von etwa 30 Mrd. \$ 2001 bis 2005 mehr als verdoppeln. Kleinste Rechner, Sensoren und Aktoren können das Leben erleichtern – aber unter Umständen auch negative Folgen haben. Diese vorherzusehen und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung vorzuschlagen, ist Aufgabe der Technikfolgenabschätzung im Allgemeinen. Militärische Anwendungen neuer Technologien

gehen mit besonderen Problemen einher, zu deren Bearbeitung das Konzept der präventiven Rüstungskontrolle entwickelt wurde.

Präventive Rüstungskontrolle

Bisherige Rüstungskontrollverträge (s. Infokasten „Verträge“) haben meist die Anzahl von Waffen beschränkt, nachdem diese zunächst in großen Mengen eingeführt wurden.¹⁾ Die mit neuen Waffen verbundene Destabilisierung wurde also nicht grundsätzlich verhindert, wie an Beispielen aus dem strategischen Wettrüsten der USA und der UdSSR deutlich wird. Wasserstoffbombe, Langstreckenrakete, Mehrfachgefechtssköpfe u. a. erhöhten die gegenseitige Bedrohung, verringerten die Vorwarnzeit und verstärkten den Druck zu frühem Angriff in einer Krise. Präventive Rüstungskontrolle zielt dagegen auf qualitative Beschränkungen, die bereits vor dem Stationieren von neuen Waffensystemen oder anderen militärischen Technologien wirken, also in den Phasen von Forschung, Entwicklung oder Erprobung (s. Infokasten „Präventive Rüstungskontrolle“). Sie soll Gefahren schon im Vorfeld einschätzen und vermeiden [4]. Dafür steht eine Reihe von Kriterien zur Verfügung: Werden die Rüstungskontrollverträge und das Kriegsvölkerrecht eingehalten? Besteht die Möglichkeit, eine neue Technologie für Massenvernichtungswaffen zu nutzen? Ergibt sich eine Destabilisierung der militärischen Situation? Drohen Wettrüsten und Weiterverbreitung oder ergeben sich Gefahren für Mensch, Umwelt und Gesellschaft?

Präventive Rüstungskontrolle beginnt mit der naturwissenschaftlich-technischen Analyse einer militärrelevanten Technologie. Anschließend werden die militärischen Anwendungen untersucht, einschließlich möglicher Nebenfolgen. Dabei müssen die Gefahren sowie der Nutzen der Technologie bewertet und gegeneinander abgewogen werden. Zeigen sich dabei relevante Gefahren, müssen schließlich Vor-

schläge entwickelt werden, wie sich die militärisch genutzte Technologie begrenzen lässt und das Einhalten dieser Begrenzungen überprüft werden kann, was dann – im Idealfall – von den Staaten aufgegriffen und vertraglich vereinbart wird.

Ich habe eine erste solche Analyse für die Mikrosystemtechnik durchgeführt [5].²⁾ In der militärischen Forschung und Entwicklung zur MST sind die USA führend – sie geben dafür mehr als zehnmals so viel aus wie der Rest der Welt.³⁾ Die meisten Projekte finanziert die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)⁴⁾. Viele davon werden an US-Universitäten durchgeführt und auch publiziert. Bei der Beurteilung der verschiedenen möglichen MST-Anwendungen bin ich zu unterschiedlichen Ergebnissen gekommen. Einige Entwicklungen sind insgesamt neutral, manche sogar eher positiv zu bewerten, z. B. Systeme zum Sichern von Waffen und Sensoren für chemische Kampfstoffe oder für die Verifikation. Für viele Anwendungen fällt das Urteil jedoch negativ aus, das gilt z. B. bei Trägheitslenksystemen für Munition oder Kleinstminen. Die größten Gefahren sehe ich bei Implantaten im menschlichen Körper sowie Kleinrobotern. Diese beiden Anwendungen sollen im Folgenden diskutiert werden. Hier rücken Dinge in den Bereich des Machbaren, die man früher zur Science-Fiction gezählt hätte.

Implantate

Zahnprothesen und künstliche Hüftgelenke sind heutzutage medizinische Routine, im Bereich der Mikroelektronik und MST sind es Herzschrittmacher sowie Innenohr-Implantate zur Reizung des Hörnervs mit Mikroelektroden. In der Forschung setzt man Gehirnelektroden ein, um Epilepsie zu untersuchen und zu therapieren. Entwickelt werden Implantate zur dosierten Abgabe von Wirkstoffen, etwa von Insulin an Zuckerkrankte.

Militärisch finanzierte FuE in den USA befasst sich mit verschiedenen Arten biologisch-medizini-

1) Dabei wurde eine qualitative Begrenzung, d. h. die Anzahl Null, nur selten erreicht, etwa beim Mittelstrecken-(INF-)Vertrag von 1987.

2) Nanotechnologie wird noch tiefer gehende Probleme stellen; MST und Nanotechnologie verstärken sich gegenseitig.

3) Deutschland ist eher zurückhaltend, in England und Frankreich gibt es mehr militärische Arbeiten.

4) www.darpa.mil

Dr. Jürgen Altmann, Experimentelle Physik III, Universität Dortmund, 44221 Dortmund, und Institut für Experimentalphysik III, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum

scher Mikrosysteme. Noch relativ unproblematisch ist das Konzept, Soldaten eine Anordnung von 0,1 mm langen Hohladeln in die Haut zu stechen, die Körperflüssigkeiten entnehmen und einer Analyseinheit zuführen. So könnten sich Verwundungen oder Wirkungen chemisch-biologischer Kampfstoffe früher entdecken und gegebenenfalls auch Gegenmittel injizieren lassen. Denkbar wäre es aber auch, solche Systeme in den Körper zu implantieren und z. B. zur Abgabe stimulierender Drogen oder Hormone zu nutzen. Andere Projekte zielen auf den Kontakt zwischen Nerven/Gehirn und elektronischen Systemen. In Militär-finanzierten Experimenten lernten Ratten, mittels Elektroden in der motorischen Hirnrinde einen Roboterarm in einer Dimension zu bewegen. Bei Affen gelang es, aus den Signalen mehrerer Neurone die dreidimensionale Trajektorie der Handbewegung vorherzusagen und so einen Roboterarm zu steuern (Abb. 1) [6].

Ein denkbare Ziel ist es, bei Soldaten den „Umweg“ über effizienten Nerv und Muskel zu vermeiden und z. B. ein Flugzeug schneller „direkt mit dem Gehirn“ zu steuern oder eine Waffe auszulösen. Auf der Eingangsseite wird darüber nachgedacht, die Palette der Sinnesorgane zu erweitern, etwa für Infrarot, Ultraviolett, Ultraschall oder Radioaktivität.

Sehr langfristig könnte es sogar möglich werden, Denkinhalte auszutauschen, dafür wären aber grundlegende Fortschritte im Verständnis der Hirnfunktion erforderlich. Es ist elektrisch oder durch Freisetzung von Botenstoffen möglich, die Zentren, welche für Stimmungen und Gefühle zuständig sind, diffus zu reizen – hierfür wären keine wissenschaftlichen oder technologischen Durchbrüche nötig. Forschung und Einsatz am Menschen sind allerdings durch ethische Prinzipien stark eingeschränkt. Zwar soll das neue DARPA-Programm „Brain Machine Interfaces“ nicht-invasive Methoden entwickeln, um Anregungsmuster im menschlichen Gehirn von außen auszulösen. Das Programm ist jedoch eng verzahnt mit invasiven Multielektroden-Untersuchungen im Tiergehirn, und ein Workshop der US-Armee diskutierte 2001 „a high risk, visionary program to develop internal measuring, monitoring, data processing and communication capabilities“, mit der Teilaufgabe

„Determine where placement of automatic monitoring/response structures within the body should be“ [7].

Implantate, die Gehirn- oder Nervensignale ableiten und Muskeln reizen, könnten gelähmten Patienten die Bewegungsfähigkeit wiedergeben. Solche Forschung und Entwicklung zu medizinischen Zwecken ist daher zu begrüßen. Nicht medizinisch begründete Implantate stellen jedoch schwierige



Abb. 1: Ein Affe wie dieser kann einen Roboterarm direkt über in seinem Gehirn implantierte Elektroden steuern. (Foto: Duke Univ.)

ethische Fragen an die Gesellschaft: Will man solche überhaupt erlauben, und wenn ja, in welchem Ausmaß? Möglich sind u. a.

- ▶ Identifikationssysteme mit Hochfrequenzabfrage, evtl. mit medizinischen Daten und Ortungsmöglichkeit,
- ▶ Systeme, welche die Gefühle beeinflussen – etwa indem sie Endorphine freisetzen oder das Gehirn mit Elektroden stimulieren,
- ▶ eine erweiterte „virtuelle Realität“ durch direktes Stimulieren von Sinnesnerven oder Hirnzentren.

Viele Arten von Missbrauch und Gefahren sind vorstellbar, etwa allgemeine Überwachung, eine Abhängigkeit wie bei Drogen und die Manipulation von Menschen.

Würde die Gesellschaft über Implantate in ähnlicher Weise diskutieren wie über Gentechnik oder embryonale Stammzellen, könnte man auf eine gründliche und umfassende Debatte hoffen, die im besten Fall zu weisen Entscheidungen führen würde. Anders als bei Gentechnik und Stammzellen liegt bei

der Implantation jedoch erhebliches militärisches Interesse vor, denn Maßnahmen, welche die Kampfkraft erhöhen, werden als sehr wichtig angesehen.

Soldaten könnten dabei durchaus freiwillig zustimmen, weil ihnen schnellere Behandlung bei Verwundungen in Aussicht steht. Dazu kommt, dass Soldaten – funktions- sowie traditionsbedingt – weniger Persönlichkeitsrechte haben, sowie die militärische Geheimhaltung.

Würden vom Militär Implantate in größerem Umfang eingesetzt, ist zu befürchten, dass dies eine breite gesellschaftliche Debatte unterlaufen und eine unumkehrbare Lage schaffen würde. Um eine solche indirekte Wirkung militärischer FuE zu verhindern und sicherzustellen, dass genügend Zeit für die gründliche Debatte aller Für und Wider bleibt, schlage ich ein Moratorium vor: *Systeme, die MST oder Mikroelektronik enthalten und nicht direkt medizinisch begründet sind, sollen mindestens zehn Jahre lang nicht in Menschen implantiert werden.* Dieses Moratorium würde im zivilen wie militärischen Bereich gelten und international vereinbart sowie durch nationale Gesetze abgesichert. Es würde indirekt auch entsprechende Forschungen im Vorfeld dämpfen. Forschung, Entwicklung und Einsatz von Implantaten für medizinische Zwecke bliebe erlaubt, müsste aber publiziert oder angemeldet werden.

Kleinroboter

Klein- und Kleinstroboter wären (mehr oder weniger) autonome Systeme, die sich fortbewegen können und Größen unterhalb einiger Dezimeter haben, perspektivisch bis unter 1 Millimeter. Zentrale Voraussetzungen sind die starke Verkleinerung von Rechnern durch MST und Nanotechnologie sowie die Entwicklung geeigneter Algorithmen. Militärische FuE in den USA zielt auf alle Medien und umfasst viele denkbare Bewegungsarten, die z. T. Insekten oder anderen Tierarten abgeschaut sind: auf dem Land mittels Rad- oder Kettenantrieb, durch Hüpfen oder Krabbeln; auch das Laufen an senkrechten oder überhängenden Flächen wie bei Geckos wird untersucht. Auf und unter Wasser wird neben Schraubenantrieb an Schlängeln und Kriechen gearbeitet. Bei Kleinstflugzeugen (Micro Air Vehicles, MAV) gibt es Konzepte mit starren Flügeln und Propeller- (Abb.

2) oder Düsenantrieb sowie Hub-schrauber, aber auch Flügel schla-gende Systeme (Abb. 3). Die DAR-PA hat für ihr MAV-Programm 15 cm als maximale Ausdehnung be-stimmt. Mit kleineren Geschwindig-keiten sind relativ größere Flügel-flächen nötig, was die Windempfind-lichkeit erhöht und die Stabilität verringert. Wegen der geringen Mas-se solcher Kleinflieger (unter 100 g bis maximal einige 100 g) ergeben sich auch für Energieversorgung und autonome Steuerung extreme Anfor-derungen.

Kleinroboter könnten auch als biologisch-technische Hybridsyste-me ausgeführt werden. Tiere, die mittels Elektroden an Nerven und Gehirn gesteuert werden – mit Rat-ten ist das schon gelungen –, könn-ten deutlich früher zur Verfügung stehen, da sie die „Hardware“ für viele Aufgaben wie Energieversor-gung, Fortbewegung, Auffassen der Umgebung schon mitbringen. Künstliche Systeme könnten als kleine Tiere, z. B. Insekten, getarnt sein. Wegen ähnlicher Funktion und zur begrifflichen Klarheit soll-ten alle solchen Systeme ebenfalls unter die Kategorie Kleinroboter gefasst werden.

Ob sich Kleinroboter zu akzeptä-

blen Kosten in großen Mengen her-stellen und für militärische Aufga-ben wirksam einsetzen lassen, ist noch offen. Es könnte jedenfalls in fünf bis zwanzig Jahren so weit sein. Gelänge dies, wären Klein-roboter für verschiedenartigste An-wendungen einsetzbar, einzeln oder

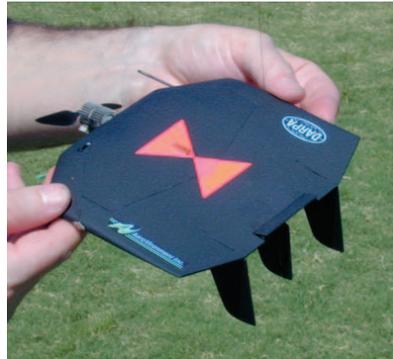


Abb. 2: Das Kleinstflugzeug „Black Widow“ der DARPA hat eine Spannweite von nur 15 cm. Beim ersten, etwa halbstündigen Testflug flog es 1,8 km weit und erreichte eine Höhe von bis zu 235 m. (Foto: J. Grasmeyer/Aero Environment).

auch im Schwarm, mit oder ohne Kooperation, eventuell von größe-ren Trägern abgesetzt oder ver-schossen: zum Aufklären und Ab-hören, Vorbringen von Störsendern, Erkunden von Wegen, als Kommu-

nikationsrelais oder zum Täuschen (Attrappen), Transport kleiner Las-ten, sowie für kleine mechanische Wirkungen. Als Waffe eingesetzt, müssten sie wegen der kleinen Nutzlast sehr nahe an das Ziel kommen, könnten dann aber an zentraler Stelle hoch wirksam wer-den, man denke nur an das Ein-dringen in ein Rechnersystem mit Durchtrennen oder Kurzschließen von Leitungen. Bei Menschen sind Injektionen oder auch kleine Sprengladungen im Gehörgang denkbar. In Massen eingesetzt, könnten Kleinroboter z. B. Ansaug-öffnungen verstopfen oder Abrieb-stoffe in Antriebe einbringen.

Kleinroboter erfüllen fast alle negativen Kriterien der präventiven Rüstungskontrolle. Nicht in existie-renden Begrenzungsverträgen er-fasst, könnten sie deren stabilisie-rende Wirkung unterlaufen. Das Kriegsvölkerrecht wäre betroffen, wenn autonome Kleinroboter zur Waffenlenkung oder als direkte Waffe eingesetzt würden – sie wer-den nicht so bald in der Lage sein, zwischen Kombattanten und Zivil-bevölkerung zu unterscheiden oder zu erkennen, ob ein Soldat kampf-unfähig ist oder sich ergeben will. Menschen über Fernsteuerung lau-fend in die Entscheidung einzube-ziehen, würde die Reaktionszeit verlängern und die militärische Wirksamkeit stark verringern. In einer US-Militärzeitschrift hieß es (bezogen auf Roboter beliebiger Größe): „Beyond technological obstacles, the potential for effective battlefield robots raises a whole series of strategic, operational, and ethical issues, particularly when or if robots change from being lifters to killers. The idea of a killing system without direct human control is frightening“ [8].

Die militärische Situation kann schon dann destabilisiert werden, wenn Kleinroboter bereits vor Ausbruch von Feindseligkeiten in geg-nerisches Gebiet gesandt werden. An zentralen Stellen postiert, wären sie in der Lage, sehr schnell ent-scheidende Schläge auszuführen – mit extrem kurzer Vorwarnzeit. Würde man sich nähernde Systeme entdecken, wäre es schwierig fest-zustellen, ob sie nur zur Aufklärung dienen oder als Waffe wirken kö-nnen. Motive zum Wettrüsten sind offensichtlich, bei Kleinrobotern selbst wie allen Arten von Gegen-maßnahmen. Sollten Kleinroboter so billig werden, dass sie sich in

Verträge zur Rüstungskontrolle

Rüstungskontrolle – im Deut-schen auch mit kooperativer Rüstungssteuerung übersetzt – bezeichnet die gegenseitig vereinbarte Beschränkung der Rüs-tungen zwischen potenziellen Gegnern. Sie entstand im Kal-ten Krieg, als zwischen den USA und der UdSSR nicht nur keine Abrüstung möglich war, sondern das Wettrüsten bei Kernwaffen und ihren Trägern zu immer stärkerer Bedrohung und höherer Instabilität führte. Es bedurfte der schockierenden Erfahrungen der Kubakrise 1962, bis die ersten bilateralen Begrenzungsverträge vereinbart wurden. Die Ziele der strategi-schen Rüstungskontrolle waren: strategische Stabilität, Vermeidung von Wettrüsten sowie Be-grenzung des Schadens, sollte es doch zum Atomkrieg kom-men. Gleichzeitig wurde aber die militärische Drohung auf-rechterhalten. Dies und die technologische Weiterentwick-lung bewirken die Gefahr des Unterwanderns, wenn nicht ge-zielt durch Abrüstung und poli-tische Entspannung entgegen-gewirkt wird.

Beispiele von Rüstungskontroll-verträgen, Jahr der Unterzeich-nung:^{*)}

- ▶ *Partieller Teststopp*, 1963: verbietet Kernexplosionen in der Atmosphäre, im Weltraum und unter Wasser
- ▶ *Nichtverbreitungsvertrag*, 1968: verbietet Nicht-Kernwaf-fenstaaten die Beschaffung von Kernwaffen, führt Sicherungs-maßnahmen der IAEO (Wien) ein
- ▶ *Biologische-Waffen-Überein-kommen*, 1972: verbietet biolo-gische Waffen; über Verifika-tionsprotokoll wird verhandelt
- ▶ *SALT I*, 1972: begrenzte die Anzahl der Abschussvorrichtun-gen für strategische Raketen
- ▶ *ABM-Vertrag*, 1972: verbot USA und UdSSR/Russland lan-desweite Raketenabwehr; durch US-Kündigung seit Juni 2002 ungültig
- ▶ *INF-Vertrag*, 1987: Abschaf-fung der landgestützten Raketen und Flugkörper zwischen 500 und 5500 km Reichweite von USA und UdSSR/Russland; erster Vertrag mit Vor-Ort-Inspektion
- ▶ *KSE-Vertrag*, 1990: legt zwi-

schigen NATO- und früheren WVO-Staaten Obergrenzen für Panzer, gepanzerte Kampffahr-zeuge, Artillerie, Kampfflugzeuge und Kampfhubschrauber fest (Atlantik bis Ural)

▶ *Offene-Himmel-Vertrag*, 1992: erlaubt zwischen NATO- und früheren WVO-Staaten Über-flüge mit Kameras u. a. (USA, ganz Russland einbezogen)

▶ *Chemiewaffen-Übereinkom-men*, 1993: verbietet chemische Waffen; Überwachungsorganisa-tion in Den Haag

▶ *Vollständiger Teststopp*, 1996: verbietet jede Art von Kern-explosion; vorläufige Über-wachungsorganisation in Wien

Abkürzungen:

- SALT: Strategic Arms Limitation Talks
- IAEO: Internationale Atomenergie-Organi-sation
- ABM: Anti-ballistic missile
- INF: Intermediate-range nuclear forces
- KSE: Konventionelle Streitkräfte in Europa
- NATO: North-Atlantic Treaty Organisation
- WVO: Warschauer Vertragsorganisation

^{*)} Vertragstexte finden sich z. B. unter www.state.gov/www/global/arms/bureau_ac/treaties_ac.html, www.state.gov/t/ac/trty/, www.auswaertigesamt.de/www/de/aussenpolitik/friedenspolitik/abr_und_r, www.opcw.org, www.ctbto.org

den Streitkräften der höchstentwickelten Industrieländer zu (Hundert-) Tausenden einführen lassen, wäre es wahrscheinlich, dass sie in andere Länder verbreitet werden oder in die Hände nicht-staatlicher Gruppen gelangen, sei es durch direkten Export, Lizenzproduktion oder Nachbau.

Auch für Mensch und Gesellschaft sind Gefahren absehbar. Wenn das Militär billige Kleinroboter in hoher Anzahl einführen würde, wäre die Verbreitung in den zivilen Bereich kaum zu vermeiden. Geheimdienste, Polizei, Detektive



Abb. 3: Bereits im nächsten Jahr soll Robofly, ein mechanisches Insekt, abheben (Foto: UC Berkeley)

und Sicherheitsfirmen würden sie wohl als erste nutzen, aber sicher auch rasch Terroristen und andere Verbrecher. Mobile Systeme, die sich unter der Tür oder durch den Briefschlitz einschleichen würden, bieten ideale Möglichkeiten für Lauschangriffe; kein Mensch müsste mehr eindringen, um eine „Wanze“ anzubringen. Kleinroboter könnten aber auch genutzt werden, um Informationssysteme und allgemeine Infrastruktur zu manipulieren oder zu zerstören. Ebenso sind verdeckte Angriffe gegen Menschen, etwa Politiker, denkbar. Sicher würden Gegenmaßnahmen getroffen, indem auch kleinere Öffnungen abgedichtet und überwacht werden, aber eine größere Unsicherheit wäre die unvermeidliche Folge.

Gibt es positiv zu wertende militärische Anwendungen von Kleinrobotern? Für friedenserhaltende Einsätze etwa durch UN-Truppen scheinen sie nicht dringend erforderlich. Aufklärung kann auch mit den schon eingeführten Drohnen (Spannweite 1,5 m und größer) stattfinden. Auch für die Minensuche bieten Land- oder Luftfahrzeuge mit über 1 m Größe bessere

Möglichkeiten, dasselbe gilt für die Bergung verwundeter Soldaten.

Gibt es wünschenswerte zivile Nutzungen von Kleinrobotern? Denkbar ist der Einsatz u. a. bei

- ▶ Verbrechensbekämpfung (Suche nach illegalen Aktivitäten, Überwachung und evtl. Bekämpfung von Geiselnehmern),
- ▶ Katastrophen (Sondieren der Lage einschließlich Schadstoffmessung, Suche nach Opfern),
- ▶ Meteorologie und Umweltschutz (Ersatz für Wetterballons, Probenahme an Schornsteinen, Kontrolle bedrohter Arten),
- ▶ Verkehrsüberwachung
- ▶ Erkundung von Mond, Planeten und Asteroiden.

Vieles könnte sich jedoch ebenso mit größeren Systemen, z. B. Modellflugzeugen oder -zeppelin von über 1 m Größe erledigen lassen oder mit fest stationierten oder handgetragenen Sensoren. Es gibt nur wenige Anwendungsbereiche, wo mobile Systeme kleiner als 0,2 bis 0,5 m sein müssen, etwa um eingestürzte Gebäude (Erdbeben, Explosion) zu untersuchen, die auf Grund von Feuer, Verstrahlung oder Giften nicht betretbar sind, sowie um enge Röhren zu inspizieren. In der Weltraumforschung kann es wegen der begrenzten Nutzlast starke Gründe für kleine Roboter geben. Ein Spezialfall wären Systeme, die sich vorübergehend in den menschlichen Körper einführen lassen, um dort medizinische Operationen vorzunehmen. Auto-, Schiffs- oder Flugmodelle von Amateuren oder frei bewegliches Spielzeug (Puppen, künstliche Haustiere) unter der bisher üblichen Größe sind sicher nicht dringlich.

Insgesamt ist das Fazit: Eine breite Einführung von Kleinrobotern würde große Gefahren mit sich bringen, im militärischen wie im zivilen Bereich, während die Vorteile sich auf sehr eng begrenzte Anwendungen konzentrieren. Somit sind in beiden Bereichen weitgehende Beschränkungen angeraten mit nur wenigen Ausnahmen, die keine Möglichkeit zur Umgehung bieten dürfen. Generell sollten die Beschränkungen so gestaltet werden, dass sie klar abgrenzbar sind und es genügend leicht überprüfbar ist, ob sie tatsächlich eingehalten werden. Um die politische und militärische Akzeptanz zu erhöhen, sollten schon eingeführte militärische, aber auch zivile Systeme möglichst wenig eingeschränkt werden.

Aus diesen Gründen schlage ich ein *generelles Verbot künstlicher beweglicher Systeme in allen Medien (Land, Wasser, Luft)*⁵⁾ vor, die eine gewisse Größe, z. B. 0,5 oder 0,2 m, unterschreiten. Das würde existierende militärische Marschflugkörper, Drohnen, Torpedos usw. unberührt lassen, aber die neue Qualität von Kleinrobotern verlässlich verhindern.⁶⁾ Mit dieser Größenschwelle ist auch die Überprüfung noch mit akzeptablem Aufwand und mit nicht zu großer Aufdringlichkeit möglich: Vor-Ort-Inspektionen mit dem Recht, Kasernen und Testgelände zu inspizieren sowie Übungen zu beobachten, würden ausreichen. Weil der Autonomiegrad von außen kaum zu erkennen ist, wird er nicht als Verbotskriterium benutzt – somit sind auch ferngesteuerte Systeme eingeschlossen. Für *unverzichtbare zivile Anwendungen von Kleinrobotern sowie im militärischen Sanitätsbereich* sollten *eng umgrenzte Ausnahmen* eingeführt werden: medizinische Operationen, Erkundung zerstörter/gefährlicher Gebäude und Inspektion enger Röhren sowie Weltraummissionen zu Himmelskörpern. Begrenzungen der Anzahl sowie bei Energieversorgung, Autonomie, Reichweite u. a., zusammen mit Ankündigungen und Inspektionen, würden Missbrauch vorbeugen. Details der vorgeschlagenen Regelungen und der Überprüfungsverfahren müssten natürlich in Verhandlungen festgelegt werden. Existierende Verträge mit Vor-Ort-Inspektionen, etwa der KSE-Vertrag und das Chemiewaffen-Übereinkommen, sind dafür gute Vorbilder.

5) Im Weltraum könnten „Verkehrsregeln“ hinzutreten, eingebettet in ein allgemeines Waffenverbot.

6) Die Probleme, die die ebenfalls in Entwicklung befindlichen größeren militärischen Roboter bzw. autonomen Kampffahr- und -flugzeuge stellen würden, werden durch den dargestellten Vorschlag nicht erfasst. Sie sollten gesondert untersucht werden; auf Grund der Größe ist es hier denkbar, zwischen Aufklärungs- und Waffenfunktionen zu trennen.

7) Ausstieg aus dem Kyoto-Protokoll zum Klimaschutz, aus dem Internationalen Strafgerichtshof, aus den Verhandlungen über ein Verifikationsprotokoll zur Biologische-Waffen-Konvention, Kündigung des ABM-Vertrages

8) www.fonas.org

9) www.bundesstiftung-friedensforschung.de

Verantwortung der Physik

Physikalische Forschung im Bereich der MST ist oft noch weit von den möglichen Anwendungen entfernt, die in viele Richtungen gehen können. Wer als Physiker/in an MST forscht, sollte die möglichen militärischen sowie negativen zivilen Nutzungen der eigenen Ergebnisse mit bedenken. Wer in der Industrie MST-Systeme für das Auto oder die Medizin entwickelt, sollte problematische Folgen in Nachbarfeldern im Auge behalten. Nur sehr wenige Physiker/innen erstellen professionell Studien zur Analyse und vorbeugenden Begrenzung neuer Militärtechnologien. Hinweise und Einzelanalysen von Kolleg(inn)en aus den verschiedenen Fachgebieten können diese Arbeit wirksam unterstützen. Während Naturwissenschaft und Technik zu tieferem Verständnis und zur Gestaltung von Mikro- und Nanostrukturen vorstoßen, steigen die möglichen Auswirkungen. Im Sinne der Verantwortung ist es dabei erforderlich, dass sich Physiker/innen – zusammen mit der Öffentlichkeit – an der Diskussion und Entscheidungsfindung beteiligen.

Ausblick

Haben Vorschläge zur Begrenzung neuer Militärtechnik Chancen auf Umsetzung? Das vorgeschlagene Moratorium bei nicht medizinisch begründeten Implantaten kann an die breit akzeptierte Medizinethik anknüpfen. Die Koalitionsverträge für die deutschen Bundesregierungen von 1998 und 2002 haben sich explizit für präventive Rüstungskontrolle bei neuen Technologien ausgesprochen. Auch wenn viele andere mittelgroße Länder Begrenzungsinitiativen unterstützen würden, geht die internationale Entwicklung gegenwärtig eher in die andere Richtung. Das liegt vor allem an den USA, aber auch Länder wie England oder Frankreich setzen auf militärtechnologische Überlegenheit. Somit ist es genau dort am schwersten, sich um Beschränkungen neuer Technologien zu bemühen, wo sie am dringendsten wären. Bei der gegenwärtigen US-Regierung kommt dazu, dass sie von internationalen Vereinbarungen generell wenig hält.⁷⁾ Das muss jedoch nicht so bleiben. Im Bereich der militärischen MST befinden sich die USA zunächst durch ihren Vorsprung im Rüstungswettlauf mit sich selbst. Es ist plausibel,

dass bei einer durch die USA initiierten Verbreitung von Kleinrobotern auch die Bedrohung der USA – durch militärische Gegner oder Terrorismus – steigen würde; dies könnten die USA – zunächst durch einseitige Zurückhaltung, dann durch internationale Vereinbarungen – verhindern. Eine solche breitere, „aufgeklärte“ Sicht des nationalen Interesses hat in den USA ebenfalls eine Tradition, wie frühere Begrenzungsverträge zeigen. Eine veränderte Haltung der USA würde von den meisten anderen Ländern unterstützt. Auch wenn das nicht so schnell eintreffen sollte, ist die wissenschaftliche Analyse von Gefahren und Ausarbeitung von Auswegen dennoch sinnvoll und kann Impulse für die internationale Meinungsbildung geben.

*

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektverbundes Präventive Rüstungskontrolle des Projektverbundes Naturwissenschaft, Abrüstung und internationale Sicherheit (FONAS)⁸⁾ durchgeführt. Die anderen Projekte befassten sich mit übergreifenden Aspekten, Raketenabwehr, biologischen Waffen und Plutoniumsorgung [9]. Der Projektverbund wurde 2000/01 vom BMBF im Rahmen dessen Prioritärer erster Maßnahmen zur Förderung der Friedens- und Konfliktforschung gefördert. Inzwischen wurde diese Förderung an die neu gegründete Deutsche Stiftung Friedensforschung abgegeben.⁹⁾

Präventive Rüstungskontrolle in einigen Abkommen

► **ABM-Vertrag** (1972–2002): verbot Entwicklung, Erprobung und Dislozierung von ABM-Systemen oder Bestandteilen, die see-, luft- oder welt-raumgestützt oder beweglich landgestützt sind; schrieb Konsultationen vor für den Fall, dass auf Grund neuer physikalischer Prinzipien andere Komponenten an die Stelle der zugelassenen Abfangflugkörper, Abschussvorrichtungen und Radargeräte treten könnten.
► **Biologische-Waffen-Übereinkommen** (1972): verbietet Entwicklung, Herstellung, Lagerung und Erwerb biologischer Waffen sowie von biologischen Agenzien und

Toxinen zu nicht friedlichen Zwecken.
► **1. Zusatzprotokoll zu den Rotkreuzabkommen** (1977): schreibt bei der Einführung neuer Waffen Prüfung vor, ob ihre Verwendung u.U. durch das Kriegsvölkerrecht verboten wäre.
► **Chemiewaffen-Übereinkommen** (1993): verbietet Entwicklung, Herstellung, Lagerung usw. chemischer Waffen.
► **Laser-Blendwaffen-Protokoll** (1995): verbietet den Einsatz von Laserwaffen, die dazu entwickelt sind, Personen dauerhaft zu blenden; hat indirekt auch die Forschung und Entwicklung dafür gebremst.

- [1] Th. Pfohl und S. Herminghaus, Physik Journal, Januar 2003, S. 35
- [2] M. Köhler et al., Phys. Bl., November 2000, S. 57
- [3] H.-P. Trah und R. Müller-Fiedler, Physik Journal, November 2002, S. 39
- [4] G. Neunack, C. Mölling, Dossier 38, Wissenschaft und Frieden, 2001
- [5] J. Altman, Military Uses of Microsystem Technology: Dangers and Preventive Arms Control, agenda, Münster, 2001 (Kurzfassung unter <http://www.ep3.ruhr-uni-bochum.de/bvp/fonassr2.html>).
- [6] J. Wessberg et al., Nature **408**, 361 (2000), M. A. L. Nicoletis, J. K. Chapin, Scientific American, Oktober 2002, S. 24
- [7] Workshop Nanoscience for the Soldier, 2001 (www.aro.army.mil/phys/Nanoscience/sec4soldier.htm)
- [8] S. Metz, Parameters **30**, 40 (Autumn 2000), (<http://carlisle-www.army.mil/usawc/parameters/00autumn/metz.htm>)
- [9] Dossier 38, Wissenschaft und Frieden, 2001