

Streitkräfte, Fähigkeiten und Technologien im 21. Jahrhundert

Future Topic

Weiterentwicklungen in der Robotik durch Künstliche Intelligenz und Nanotechnologie

Welche Herausforderungen und Chancen erwarten uns?

Impressum

Herausgeber

Planungsamt der Bundeswehr
Dezernat Zukunftsanalyse
Oberspreestraße 61L
12439 Berlin

E-Mail: plgabwdezzuka@bundeswehr.org

Layout und Druck

Print- und Medienzentrum
Wehrbereichsverwaltung Ost

Titelbilder

Von links nach rechts:

Bild 1: Mikroaufklärungsdrohne MIKADO, Foto von Haevescher

Bild 2: wissenschaft_0906_010 Roboter des Fraunhofer Instituts IFF, Foto von David Kirsch

Bild 3: DSC05282.JPG Mobile Roboter und Autonome Systeme, Hannover Messe 2008, Halle 25,
Foto von Steamtalks

Bild 4: DLD06: Asimo Honda zeigt seinen Roboter, Foto von Martin Roell

Bild 5: DSC05247.JPG DFKI-Stand, Hannover Messe 2008, Halle 25, A 21, Foto von Steamtalks

März 2013

© **Planungsamt der Bundeswehr, Dezernat Zukunftsanalyse**

Alle Rechte vorbehalten. Reproduktion und Veröffentlichung nur nach ausdrücklicher Genehmigung durch das Planungsamt der Bundeswehr, Dezernat Zukunftsanalyse.

Vorwort

Das Planungsamt der Bundeswehr bündelt Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortung im Planungsnetzwerk für die Bundeswehr auf der dem BMVg nachgeordneten Ebene. Es stellt unter anderem Methodenkompetenz und wissenschaftliche Werkzeuge für die Bundeswehr bereit und erarbeitet die Grundlagen für die zukünftige Ausrichtung der Bundeswehr.

In diesem Rahmen dient Sicherheitspolitische Zukunftsanalyse dem Zweck, frühzeitig und auf wissenschaftlicher Basis Erkenntnisse für die Fortschreibung konzeptioneller Vorgaben und Ziele zu gewinnen. Sie liefert ergebnisoffen und weisungsungebunden Ideen und Impulse für die zukünftige Ausrichtung der Bundeswehr und ist somit ein zentraler Bestandteil der Zielbildung.

Die Studien des Dezernats Zukunftsanalyse werden ressort-intern erstellt. Neben militärischer Expertise werden vor allem Erkenntnisse ziviler wissenschaftlicher Einrichtungen sowie verschiedener Ressorts des Bundes genutzt. Gleichwohl sind die Ergebnisse nicht mit anderen Ressorts und Forschungseinrichtungen abgestimmt und sollen auch keinen Eingriff in deren Verantwortlichkeiten darstellen. Die Studienarbeiten des Dezernats Zukunftsanalyse spiegeln keine offiziellen Positionen des BMVg wider.

Weiterentwicklungen in der Robotik durch Künstliche Intelligenz und Nanotechnologie

Welche Herausforderungen und Chancen erwarten uns?

Auszug aus Asimovs Kurzgeschichte „Runaround“:

In einer fernen Zukunft befinden sich die beiden Weltraumingenieure Gregory Powell und Michael Donovan auf dem Merkur, um einen außer Kontrolle geratenen Roboter einzufangen. Bei der Fehleranalyse entwickelte sich folgendes Gespräch zwischen ihnen:

„Powells Radiostimme klang angespannt in Donovans Ohr. ‚Nun pass mal auf! Fangen wir mit den drei Grundregeln des Roboterdienstes an - jenen Grundregeln, die am allertiefsten eingegraben sind in das positronische Gehirn eines jeden Robots!‘ In der Dunkelheit zählte er die einzelnen Punkte an seinen anzugbedeckten Fingern ab. ‚Wir haben also - erstens: Ein Robot darf kein menschliches Wesen verletzen oder durch Untätigkeit gestatten, dass einem menschlichen Wesen Schaden zugefügt wird.‘ ‚Stimmt.‘ ‚Zweitens‘, fuhr Powel fort, ‚muss ein Robot den ihm von einem Menschen gegebenen Befehlen gehorchen, es sei denn, ein solcher Befehl würde mit Regel Eins kollidieren.‘ ‚Stimmt.‘ ‚Und drittens: Ein Robot muss seine eigene Existenz beschützen, solange dieser Schutz nicht mit Regel Eins oder Zwei kollidiert.‘“¹

Einleitung

“I can’t define a robot, but I know one when I see one.”

Joseph Engelberger (Entwickler des Unimate)

Der Begriff Roboter weckt die unterschiedlichsten Assoziationen im Menschen. Die Einen denken an Spielfilme wie „I Robot“², andere an Science-Fiction Romane und Assimovs Gesetze (siehe Auszug oben), die Nächsten an Industrieroboter, ein Vierter an seinen neuen Rasenmäher und manche auch an neuartige Kriege mit Kampfrobotern. Uns begegnet der Begriff Roboter zunehmend in allen erdenklichen Lebensbereichen – doch was verstehen wir heute unter einem Roboter?

In der Wissenschaft gibt es mit der Robotik einen eigenen Zweig, der sich mit der Erforschung und Weiterentwicklung der Fähigkeiten von Robotern beschäftigt. Das vorliegende Future Topic behandelt die neuesten Entwicklungen der Roboterforschung und deren mögliche Auswirkungen auf Aspekte der Sicherheitspolitik und auf Streitkräfte.

Nach einem kurzen Überblick durch die Geschichte der Robotik und der Darstellung heutiger Einsatzbeispiele wird im Hauptteil auf wesentliche Forschungsergebnisse mit deutlichem Zukunftsbezug eingegangen. Anschließend sollen die Fragen „Welchen Nutzen können die neuen Roboter für Streitkräfte haben?“ und „Was können wir tun, wenn sie gegen uns verwendet werden?“ beantwortet werden.

Geschichte der Robotik und Definition

Robotik beziehungsweise Robotertechnik versucht, mit Hilfe von Informationstechnik

und Mechanik Systeme zu schaffen, die aktiv in und mit ihrer Umwelt agieren können. Der Kernbereich der Robotik liegt dabei in der Entwicklung und Steuerung von Robotern. Ziel ist es, durch Programmierung ein gesteuertes Zusammenarbeiten von Roboter-Elektronik und Roboter-Mechanik zu erreichen. Dabei bedient die Robotik sich vordergründig der Erkenntnisse aus den Bereichen Informatik, Elektronik und Maschinenbau.

Eine wissenschaftlich vereinheitlichte Definition des Begriffs Roboter gibt es bislang noch nicht. Als Roboter werden zu verschiedene Maschinen mit unterschiedlicher Ausprägung, Mobilität und Autonomie bezeichnet.

Das Wort Roboter selbst geht auf den slawischen Ausdruck *robotá*, der „Arbeit“ oder „Fronarbeit“ bedeutet, zurück.

Im 18./19. Jahrhundert stand der Versuch, einzelne spezifische menschliche Fähigkeiten auf eine Maschine zu übertragen, im Vordergrund. In jener Zeit erfand Charles Babbage zum Beispiel eine mechanische Rechenmaschine, und konstruierten Henri Maillardet eine schreibende Puppe und Jaques de Vaucanson eine mechanische Ente inklusive Verdauungsapparat.³ Den ersten funktionierenden programmgesteuerten Computer baute Konrad Zuse im Jahr 1949, womit der Grundstein für die freie Programmierbarkeit von Bewegungen, wie zum Beispiel Greifoperationen, einer Maschine gelegt war. Aber erst nachdem auch erforderliche Materialien und Mikroprozessoren entwickelt worden waren, die in eine bewegliche Maschine eingebaut werden konnten, stand dem Bau erster Roboter-Prototypen nichts mehr im Wege. Besonders die Fähigkeit der Programmierung inklusive wiederholter Neuprogrammierungen von Robotern unterscheidet diese von „dummen“ Handha-

bungsautomaten, also Spezialmaschinen, wie zum Beispiel Waschmaschinen. Der erste echte Industrieroboter war der *Unimate* der Firma *Unimation*, der Mitte der 1960er Jahre vorgestellt wurde.⁴

Abbildung 1: Unimate Puma 200 Robot Arm.



Quelle: Razor Robotics (2010)

In diesem Future Topic wird unter dem Begriff *Roboter* im Weiteren ein System verstanden, das mit Sensoren seine Umwelt wahrnimmt und sich mittels Aktoren in ihr bewegt. Alle in diesem Sinne betrachteten Roboter verfügen über eine Art Mobilität, die das Überwinden von Strecken oder Hindernissen beinhalten kann, wie auch das gezielte Bewegen im Verbund.

Der Grad der Bewegungsfreiheit hängt dabei stark von der Umgebung und von der Bauweise des Roboters ab. Darüber hinaus können Roboter in diesem Verständnis (teil)autonom Aufgaben/Missionen erfüllen. Die Aufgaben werden durch Programmierung reversibel so in das System integriert, dass eine Neuprogrammierung grundsätzlich möglich ist. Alle so definierten Roboter besitzen eine integrierte Energieversorgung, auf die in diesem Future Topic ebenso wenig eingegangen wird, wie auf verwendete unterschiedliche Sensoren. Bezüglich der Ausmaße werden grundsätzlich vier Größenordnungen unterschieden: *Metaskopische Systeme*, *Makroskopische Systeme*, *Mesoskopische Systeme* und *Mikroskopische Systeme*.

Box 1- Größenordnungen von Robotern



Metaskopische Systeme (1m und größer) MALE⁵ - Unbemanntes Fluggerät (UAV) Heron 1 zur taktischen Luftaufklärung mit langer Stehzeit im Operationsgebiet

Quelle: Bertram (2008).



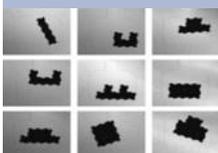
Makroskopische Systeme (10 cm bis 1 m) Mikroaufklärungsdrohne MIKADO für den Ortsbereich

Quelle: Haevescher (2008).



Mesoskopische Systeme (1 cm bis 10 cm) Schwarm „Microroboter“ der Testplattform Jasmin des Instituts für Verteilte Systeme der Universität Stuttgart.

Quelle: IPVS (2007).



Mikroskopische Systeme (1 mm und kleiner) Bilder aus einer Videosequenz, die die manipulierte Selbstorganisation von Mikroteilchen in einer Flüssigkeit zeigen. (Cornell Universität New York)

Quelle: Tolley et al. (2008: 2541051- 2541053).

Einsatz von Robotern heute

Bereits heute werden Roboter in nahezu allen Lebensbereichen erfolgreich eingesetzt. In einigen zivilen Bereichen ist ihr Einsatz mittlerweile allgegenwärtig. Die Industrie nutzt Roboter nicht mehr nur in der Produktion, sondern auch in der Lagerhaltung. Immer öfter erfolgen die Überwachung, Sicherung und Inspektion vor allem großer Anlagen durch Roboter unterschiedlichen Typs, oftmals schon autonom⁶ beziehungsweise teilautonom⁷. In Staaten mit hoher Technikaffinität (Japan, Südkorea⁸) findet man Roboter darüber hinaus bereits in Sozial- und Serviceleistungsbereichen, in denen sie zum Teil schon Eingang in die Gesetzgebung ge-

funden haben (z.B. Roboterkodex Südkorea).⁹ Auch in anderen Ländern, unter anderem in Deutschland, wird intensiv an Robotern für soziale Belange geforscht. Einige Beispiele für erste Anwendungen sind Geh- und Transporthilfen in der Krankenpflege, ihr Einsatz als Therapeuten in der Rehabilitation und bei Krankheiten wie zum Beispiel Autismus. Im Bereich Bildung gibt es erste Museumsroboter wie im Museum für Kommunikation in Berlin (siehe Abbildung 2). Selbst in Kinderzimmern haben Roboter in Form von Spielzeugen (Lego[®] Mindstorms[®], My Keepon[®]) Einzug gehalten.¹⁰ Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Interesse und die Forschung an Robotern weltweit stark angestiegen sind. Es vergeht kaum ein Tag, an

dem keine Meldung über neue Schritte auf dem Weg zum künstlichen Gehirn, zu künstlicher Intelligenz (vgl. Box 2), künstlicher Kreativität, künstlicher Haut, künstlicher menschlicher Motorik oder ähnlichem in den Medien zu lesen ist.¹¹

Abbildung 2: Roboter „Mach was“ aus dem Museum für Kommunikation Berlin



Quelle: Köhler (2003).

Der militärische Einsatz von Robotern ist im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts stark gestiegen. Fliegende unbemannte Systeme werden unter anderem zur Aufklärung und zum Bekämpfen von Gegnern, Systeme am Boden zur Entdeckung und zum Räumen von Sprengmitteln, Systeme auf und unter Wasser zur Minendetektion und zum Räumen genutzt. Einige dieser Systeme arbeiten bereits autonom beziehungsweise teilautonom. Führend sind auf diesem Sektor – besonders auf dem Feld autonomer Systeme – die USA und Israel. Auch die Bundeswehr ist mit autonomen oder teilautonomen robotischen Systemen, zumindest für den Einsatz in der Luft und im Wasser, ausgestattet. Beispiele sind das Quadropter-System MIKADO und

der in der Erprobung befindliche SEEOTTER für teilautonome Seeminenortung. In der Bundeswehr bisher eingesetzte bodengebundene Systeme zur Aufklärung oder zum Räumen von Kampfmitteln im Bereich konventioneller Spreng- und Brandvorrichtungen und bei chemischen, biologischen, radiologischen und nuklearen Gefahren besitzen dagegen eine manuelle Steuerung per Funk oder Kabel.

Zukünftige Entwicklungen

Die im Folgenden beschriebenen Forschungsergebnisse gehen oft weit über heute bereits in der Erprobung befindliche Systemfähigkeiten hinaus. Vor allem mit den Möglichkeiten der sogenannten Künstlichen Intelligenz und der Miniaturisierung unter Nutzung von Effekten der Nanotechnologie wird in Laboren an vielfältigen Robotern teilweise völlig neuer Art geforscht. Neue Entwicklungen in der Robotik werden dabei mit Hilfe technologischer Fortschritte und Synergieeffekte in unterschiedlichen Bereichen vorangetrieben. Weiterentwicklungen hin zu immer kleineren Dimensionen in den Bereichen Mikroelektronik und Mikromechanik werden auch weiterhin eine stetige Verkleinerung der Systeme ermöglichen. Ansätze aus unterschiedlichen Energietechnologien werden dazu beitragen, dass die Energieversorgung verbessert wird, was eine längere Nutzungsdauer und damit auch eine größere Reichweite ermöglichen wird. Die Nutzlast wird infolgedessen ebenfalls gesteigert werden können. Erkenntnisse aus der Biotechnologie und aus den Materialwissenschaften werden zur Entwicklung neuer Materialien beitragen. Dies wird zum einen zu neuen Eigenschaften und Funktionen führen, die durch die neuartige Materialien ermöglicht

werden (z.B. Tarnung, Schutz) und zum anderen zum Einsatz von Materialien, die selbst Funktionen ausführen können (z.B. Energieerzeugung, Selbstheilung). Neue und weiterentwickelte Sensor- und Netzwerktechnologien in Kombination mit Verhaltens- und Kognitionswissenschaften werden neue Möglichkeiten bei der Kommunikation und Interaktion von Robotern untereinander und mit dem Menschen eröffnen.¹²

Im Folgenden werden zunächst die im Rahmen des Schaffens *Künstlicher Intelli-*

genz (siehe Box 2) sehr unterschiedlichen Konzepte der *Kognitiven Robotik*, der *Evolutionären Robotik* und der *Multirobotersysteme* erörtert, die wichtige Bausteine für die Weiterentwicklung der Robotersoftware oder sogar maßgebliche Bestandteile der Software selbst sein werden. Nach einigen grundsätzlichen Ausführungen zum Thema *Miniaturisierung*, die sich mit der Hardware der Roboter beschäftigt, folgt eine Darstellung von Systemen, getrennt nach dem Medium ihres Einsatzes – zu Land, in der Luft und im Wasser:

Box 2 – Künstliche Intelligenz

Der Forschungsbereich, der sich mit der Nachbildung menschlicher Wahrnehmung und menschlichen Handelns durch Maschinen beschäftigt, wird als Künstliche Intelligenz (KI) bezeichnet. Was einmal als Wissenschaft der Computer-Programmierung begann, hat sich mehr und mehr zur Erforschung des menschlichen Denkens entwickelt. Es hat sich herausgestellt, dass vor der Entwicklung von KI das menschliche Denken selbst erforscht und verstanden werden muss. Enge Überschneidungen gibt es daher zwischen den Bereichen KI, Neurologie und Psychologie.

Die bisher visionär gebliebene sogenannte *Starke KI* hat zum Ziel, eine Intelligenz zu erschaffen, die wie der Mensch kreativ denken und Probleme lösen kann, die ein Selbstbewusstsein entwickelt und die die Möglichkeit hat, Emotionen auszudrücken.

Die in den letzten Jahren immer erfolgreichere *Schwache KI* soll dagegen in konkreten Anwendungen durch Selbstorganisation und *embodied intelligence* Problemlösungen finden. Dabei geht es um die Simulation intelligenten Verhaltens mit Mitteln der Mathematik und Informatik.

Einzelne Teilgebiete der KI sind *Wissensbasierte Systeme*, *Spracherkennung*, *Musteranalyse* und –*erkennung* sowie *Robotik*.

Der von Alan Turing vorgeschlagene *Turing Test*¹³ soll ermöglichen festzustellen, wann eine Maschine eine dem Menschen gleichwertige Intelligenz simuliert. Bisher hat keine Maschine den Turing Test bestanden.

Kognitive Robotik (KR)

In Zukunft wird es zunehmend Roboter geben, die in sich wandelnden Umweltsituationen sinnvoll autonom agieren können und dabei ein Verhalten zeigen, das über die bei ihrer Konstruktion explizit vorgegebenen Verhaltensmuster hinausgeht. Um diesen Stand der Technik zu erreichen,

versucht die Forschung unter anderem kognitive¹⁴ Fähigkeiten von Tier und Mensch auf robotische Systeme zu übertragen. Während Entwickler heute mit der Robotersteuerung festgelegte Verhaltensmuster für die Interaktion mit der Umwelt anhand von Sensordaten festlegen, wird der Roboter im Rahmen der KR – ähnlich der Individualentwicklung von Menschen –

lernen, seinen Körper und seine Umwelt wahrzunehmen und mit ihr zu interagieren.¹⁵ Ansätze sind dabei das Lernen mittels Imitation, aber auch der Versuch, Emotionen mit Computermodellen darzustellen. Die Wissenschaft erhofft sich dabei aus Erkenntnissen der Emotionsforschung, insbesondere der individuellen und der sozialen Emotion, Verbesserungen bezüglich der Mensch-Maschine Interaktion (sozialer Aspekt) und eine höhere Effektivität des Roboters bei der Interaktion mit und Erkundung von seiner Umwelt (individueller Aspekt). Erste Entwicklungen aus dieser Forschung gehen soweit, dass Roboter/Computer bereits kreative Arbeiten verrichten, das heißt Bilder malen oder Musik komponieren können.¹⁶

Evolutionäre Robotik (ER)

„Die Evolutionäre Robotik ist eine Disziplin, in der Roboter mittels Evolutionärer Algorithmen geschaffen und weiterentwickelt werden.“¹⁷ Sie orientiert sich am Vorbild der natürlichen Evolution. Mit ihrer Hilfe soll neben einer Erhöhung des Autonomiegrades auch die Optimierung anderer Eigenschaften, wie die der äußeren Gestalt, der Fortbewegung, der Anpassung an die Umgebung und der Lernfähigkeit angepasst werden. Die Roboter werden dabei als autonome, künstliche Lebewesen betrachtet. Man programmiert sie zum Beispiel durch einfache Lernregeln so, dass sich ihre Gehirne¹⁸ von selbst entwickeln und sich diese dem eigenen Körper und der Umgebung so anpassen, dass sie eigenständig und ohne menschliche Hilfestellung mit ihrer Umgebung interagieren und ihre Aufgabenstellung erfüllen können. Heute wird ER häufig als ein Optimierungsverfahren angewandt, das für vorgegebene Aufgabenstellungen in definierten,

abgeschlossenen Umgebungen genutzt wird. Um in Zukunft wirklich autonome Roboter zu entwickeln, müssen die simulierten Umgebungen komplexer und variabler gestaltet werden. Gleichzeitig muss die Fähigkeit zu lernen, das heißt einmal Erlerntes bewerten, speichern und wieder abrufen zu können, in die Programme integriert werden. Dem kommt zu Gute, dass die immer weiter steigende Rechnerleistung von Computersystemen die Simulation von Robotersystemen in künstlichen komplexen Umwelten enorm beschleunigt. Daneben sind für die Weiterentwicklung der ER in Zukunft auch Erkenntnisse aus den Neurowissenschaften, der Entwicklungsbiologie und der Morphologie von großer Bedeutung, wobei umgekehrt auch in der ER gewonnene Ergebnisse zur Verifizierung von Erkenntnissen in den Lebenswissenschaften genutzt werden könnten.¹⁹

Abbildung 3: Ein Roboter probiert in einer Simulation Bewegungen aus, mit denen er über eine Mauer klettern könnte.



Quelle: Albus (2009: 11)

Multirobotersysteme (MRS)

Ein System aus mehreren untereinander kooperierenden Robotern ohne zentrale Kontrollinstanz wird als MRS bezeichnet. Dabei kann es sich um homogene²⁰ oder

heterogene²¹ Systeme handeln. Die Kooperation der einzelnen Teilsysteme beruht auf Kommunikation untereinander. Unter expliziter Kommunikation versteht man dabei eine direkte Informationsübermittlung von Roboter an Roboter, zum Beispiel per Funk. Implizite Kommunikation funktioniert dagegen über die Wahrnehmung von Veränderungen der Umwelt, die durch andere Roboter hervorgerufen werden.

MRS zählen zu den Multiagentensystemen, die durch einen physikalischen (Roboter) und einen softwarebasierten Anteil (Softwareagenten) gekennzeichnet sind. Da beide Anteile in unterschiedlichen Umgebungen operieren, ist es derzeit noch schwierig, Erkenntnisse aus dem jeweils anderen Bereich umzusetzen. Bei weiter steigender Rechenleistung und zunehmender Beherrschung der Komplexität wird die Verschmelzung beider Anteile in Zukunft jedoch möglich sein.

MRS eignen sich für die Verwendung als Schwarm, ähnlich dem Verhalten von Insekten oder Fischen. Bereits wenige Verhaltensregeln²², die jeweils an das System/die Aufgabe angepasst sein müssen, reichen aus, um komplexe Aufgaben zu bewältigen. Einem anderen Ansatz folgen MRS, die nach marktwirtschaftlichen Prinzipien operieren. Ähnlich einer realen Ökonomie verfolgen die Einzelsysteme dabei in einer virtuellen Ökonomie eigene Interessen, so dass das MRS im Ergebnis von

der Effizienz und Flexibilität einer Marktwirtschaft profitiert. Ebenfalls interessant sind Forschungen, in denen sich MRS eigenständig zu neuen Substrukturen miteinander verbinden. Das Ziel all dieser MRS ist das Bewältigen von Aufgaben, die ein einzelner Roboter nicht, nur schwer oder nur unter erheblichem Zeitaufwand bewältigen könnte. Hinzu kommt der Vorteil, dass Fehler oder auch Ausfälle in einem Verbund besser zu verkraften beziehungsweise zu kompensieren sind.²³

Miniaturisierung

Entwicklungen in der *Nanotechnologie*, die sich aus dem Vordringen in Bereiche der atomaren Größenordnung ergeben (siehe Box 3), ermöglichen schon heute eine deutliche Verkleinerung elektronischer und mechanischer Systeme. Die daraus resultierende Miniaturisierung von Bauteilen ermöglicht es, das System insgesamt zu verkleinern oder bei gleicher Größe und Gewicht des Gesamtsystems mehr Sensoren und Aktoren zu integrieren. Damit einhergehen eine Verringerung der Signatur und der Systemkosten. Die Miniaturisierung des Gesamtsystems kann aber auch zu verkürzter Einsatzdauer, geringerer Nutzlastkapazität und zum Verlust der mechanischen Robustheit führen.

Box 3 – Nanotechnologie

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff, der Forschung aus unterschiedlichen Bereichen der Chemie, der Physik, des Maschinenbaus und der Materialwissenschaften vereinigt. Allen gemein ist die gleiche Größenordnung von einzelnen Atomen bis hin zu 100 Nanometer (nm). Ein Nanometer ist dabei ein Milliardstel Meter (10^{-9}). Diese Dimensionen kennzeichnen einen Grenzbereich, in dem die Oberflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften zunehmend bestimmend sind, das heißt nicht mehr nur das Material selbst, sondern vielmehr seine Größe bestimmt maßgeblich die Eigenschaften eines Objektes (größeninduzierte Funktionalität). Zum einen werden diese Effekte bei schon lange genutzten Materialien (Pigmente, Oberflächenbeschichtungen, Filme) ausgenutzt, zum anderen wird beim Design neuer Systeme (z. B. *Carbon Nanotubes*) gezielt auf die Ausnutzung der besonderen Oberflächeneigenschaften geachtet. Damit können neue Materialien mit zum Beispiel extrem hoher Festigkeit oder hoher elektrischer Leitfähigkeit gezielt entwickelt werden, die eine breite Anwendung als höchstauflösende Displays mit deutlich reduziertem Energieverbrauch, ultrafeste Fasern oder erheblich miniaturisierte elektronische Schaltungen finden können.²⁴

Es gibt allerdings auch kritische Stimmen, die sich mit der Nanotechnologie befassen. Verschiedene aktuelle Studien zeigen, dass die Bioverträglichkeit verschiedener Nanoprodukte nicht bewiesen werden kann. Durch ihre geringe Größe können sie wesentlich leichter in Gewebe und Zellen eindringen. Noch ist nicht abschließend geklärt, ob und – wenn ja – wie sie das Geschehen in der Zelle beeinflussen.²⁵

Bedingt durch die bereits umfängliche Anwendung der Nanotechnologie in der Industrie bei gleichzeitig unklaren beziehungsweise widersprüchlichen Studienergebnissen hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für Mensch und Natur, ist der Forschungsbedarf in dieser Fachrichtung auch in Zukunft dringend gegeben.

Bodengebundene Roboter

Heute verbreitete bodengebundene Plattformen werden mit Rädern und Ketten angetrieben. Eine Verkleinerung dieser Roboter unterhalb der bisher entwickelten geringsten Größen scheint kaum sinnvoll, da dies mit einer sinkenden Geländetauglichkeit einhergehen würde. Aus diesem Grund liegt der Forschungsschwerpunkt der Miniaturisierung bei der Entwicklung neuer Formen des Antriebs:

Hüpfende und sprunghafte Plattformen haben heute ihre größten Schwierigkeiten bei zielsicheren Ortswechseln mit kontrollierter Landung. Langfristig sollten diese Herausforderungen aber überwunden werden.

Laufmaschinen (LaufBots) mit vier, sechs oder mehr Beinen bieten zur Miniaturisierung die größten Potenziale. Die hohen Anforderungen aufgrund der Komplexität der Aktorik mit vielen Gelenken, Motoren und deren Steuerung, verbunden mit einer hohen Zahl an Sensoren zur Überwachung der Bewegung machen die Entwicklung allerdings sehr aufwändig. Es existieren bereits zahlreiche Prototypen und Studien zu verschiedenen Bewegungskonzepten mit mehr als zwei Beinen. Biologische Vorbilder von Gliederfüßern (Skorpione, Spinnen) und kleinen Wirbeltieren (Mäuse, Geckos) stehen hier für die untere Größengrenze geländegängiger Laufmaschinen und für zwei grundsätzlich unterschiedliche Konzepte für den Aufbau flexibler oder modularer Plattformen Pate. Gliederfüßer

bieten Beispiele für ein Außenskelett, das heißt für starre Segmente mit flexibler Verbindung, Wirbeltiere dagegen Muster für ein Innenskelett, das heißt ein innen liegendes, gelenkiges, tragendes Gerüst mit einer flexiblen äußeren Umhüllung. Beide Konzepte haben sich als praktikabel erwiesen und finden bereits Anwendung.²⁶

Chemical Robots (ChemBots) sind Vertreter einer weiteren neuen Klasse mobiler Roboter. Primär für den militärischen Einsatz konzipiert, zeichnen sie sich durch eine weiche, flexible Gestalt aus. Sie sind in der Lage, sich durch Öffnungen zu quetschen, deren Durchmesser unterhalb der eigenen Körpergröße liegen. Der Roboter soll sich nach dem Einsatz vor Ort biologisch oder chemisch zersetzen.²⁷

Wieder andere Ansätze verfolgt die *modulare Robotik (ModBots)*, bei der eine Gestaltänderung durch eine situationsangepasste Rekonfigurationsfähigkeit mittels starrer, koppelbarer Miniaturroboter erreicht wird.²⁸

Die bisher vorgestellten Technologien werden in den Bereichen der meta-, makro- und mesoskopischen Größenordnung verwendet. Im Bereich der mikroskopischen Größenordnung befinden sich entsprechende Konzepte und Entwicklungen zu weiten Teilen noch im Stadium der Grundlagenforschung. In den nächsten fünf bis zehn Jahren ist hier mit deutlichen Fortschritten zu rechnen. Es werden derzeit verschiedene Konzepte parallel verfolgt: Es wird unter anderem untersucht, ob beziehungsweise wie die Interaktion von Millionen von Robotern im Millimeter- oder Sub-Millimeterbereich gesteuert werden kann, um ein zielgerichtetes Verhalten zu erreichen. Eine Möglichkeit ist die Steuerung durch das Anlegen einer definierten äußeren Spannung oder durch Licht. An der dafür nötigen programmierbaren

Grundsubstanz wird noch geforscht, anwendungsreife Produkte wie dynamische 3D-Präsentationsmodelle sollen in circa zehn Jahren verfügbar sein.²⁹ Einen ähnlichen Ansatz verfolgte das von der *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*³⁰ des US Militärs 2009 ausgeschriebene Forschungsprogramm *Programmable Matter (PM)*. Ziel war der Aufbau vorgegebener dreidimensionaler, werkzeugartiger Objekte aus einer Grundsubstanz. Die DARPA hatte die Struktur der Grundsubstanz nicht vorgegeben. Die von der DARPA finanzierten Projekte finden heute zum Beispiel ihren Fortgang in Projekten des *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, deren Forscher Biomoleküle³¹ oder faltbare zweidimensionale Strukturen³² (siehe Abbildung 4) als Vorbilder nehmen oder des *Cornell Creative Machines Lab* der *Cornell Universität New York*³³, deren Wissenschaftler unterschiedliche Ausgangsstrukturen verwenden.

Abbildung 4: Smart Sheet vom MIT



Quelle: *Massachusetts Institute of Technology (2013b)*

Unterwasserroboter

Bei Bestrebungen zur Miniaturisierung von Unterwasserrobotern³⁴ können zwei parallele Entwicklungen beobachtet werden. Die eine betrifft *makroskopische Roboter (UWBots)* die durch Flossen (biomimetische Antriebsformen) angetrieben werden. Sie haben gegenüber Propellerantrieben den Vorteil der geräuschlosen und ener-

gieweffizienteren Fortbewegung. Eine weitere Verkleinerung über die momentan kleinste Größe von circa zehn Zentimetern hinaus ist technisch machbar, allerdings nur unter der Voraussetzung der Steigerung der bisher erreichten effektiven Geschwindigkeiten. Diese ist für den Einsatz in freien Gewässern nötig, um eine Bewegung entgegen einer Reihe physikalischer Phänomene, wie vertikale und horizontale Strömungen, Salz- oder Temperaturschichtungen, die Objekte zum Absinken oder Aufsteigen veranlassen, zu gewährleisten. Durch eine Verkleinerung einzelner Bauteile der UWBots ist wie bereits erwähnt eine umfangreichere Ausstattung mit Sensorik oder die Erhöhung der Nutzlast möglich. Die zweite Entwicklungsrichtung beschäftigt sich mit *biofluidischen Robotern (NanoBots)*, mikroskopisch kleinen Robotern für den Einsatz in Biofluiden (z.B. in Blutbahnen). Die größte Herausforderung für die Forschung ist hier die Realisierung des Antriebs. Es werden passive (äußeres Magnetfeld) und auch aktive (Geißelantrieb) Varianten verfolgt. Erste Prototypen für beide Varianten sind bereits erfolgreich getestet worden oder stehen vor ihrer Fertigstellung. Bisher wurde noch nicht gezeigt, ob die Verfahren prinzipiell gefahrlos auf biologische Systeme übertragen werden können und ob aufgrund ihrer Größe physikalische Effekte³⁵ im Mikrometerbereich vor allem bei weiterer Verkleinerung den Einsatz behindern werden.

Nano Air Vehicles (NAV)

Die Überlegung, kleinste fliegende Roboter zur Überwachung oder Aufklärung zu verwenden, führte zu einer großen Vielzahl an Forschungsprojekten, die sich mit der Übertragung des Prinzips des Insektenfluges auf kleinste robotische Plattformen

(Dezimeter- und Zentimeterbereiche) beschäftigen. Im Gegensatz zu Makro- beziehungsweise Mikrooptern, die starre Flügel oder Propeller für den Auftrieb nutzen, zeichnen sich NAV als Plattformen mit schlagenden Flügeln aus. Die Kinematik³⁶ des Insektenfluges ist sehr variabel, die aerodynamischen Effekte sind bislang noch nicht vollständig verstanden und auch der Flügelaufbau ist hoch komplex. Bisher ist es nicht gelungen, diese Komponenten vollständig auf NAV zu übertragen. Durch Vereinfachungen und Optimierungen gelingt es jedoch bereits heute, insektengroße NAV unter Laborbedingungen ferngesteuert fliegen zu lassen. Autonome Flüge werden in absehbarer Zeit möglich sein, wenn bis dahin weitere Fortschritte in der Steuerung der Flügelbewegung gemacht werden. Fliegende Systeme haben ähnlich wie wassergebundene Systeme gegenüber bodengebundenen Systemen die spezifische Schwierigkeit, neben einem Vortrieb auch genügend Auftrieb sicherzustellen. Diese zusätzliche Aufgabe erfordert zusätzliche Energiereserven, um bei Energiemangel oder Ausfall des Antriebs ein Abstürzen des Systems zu verhindern. Besonders die durch die Miniaturisierung verringerte Nutzlast kann daher bei NAV zu einem Problem in der Energieversorgung führen. Neue Entwicklungen im Bereich der Energietechnik mit erhöhter Speicherkapazität können dem entgegenwirken.

Potenzialanalyse

In der Vergangenheit waren es in der Regel Streitkräfte, die das Entwickeln ferngesteuerter und später teilautonom oder autonomer Systeme aktiv vorantrieben haben. Die Beweggründe bestanden in erster Linie darin, weit hinter gegnerischen

Verbänden, gegebenenfalls im Land des Gegners selbst, Aufklärungsergebnisse zu gewinnen, ohne eigene Soldaten zu gefährden.

Mittlerweile basiert die Weiterentwicklung autonomer Systeme aus unterschiedlichen Gründen nicht mehr vorrangig auf militärischen Erwägungen, sondern wird vielmehr von Forschungseinrichtungen mit Fokus auf zivilen Anwendungsmöglichkeiten vorangetrieben.

Militärische Anwendungen autonomer Systeme sind zunehmend ein Randprodukt ziviler Technologien geworden, die militärisch adaptiert werden.

In Wissenschaft und Öffentlichkeit finden zahlreiche Diskussionen um unbemannte autonome Systeme und die unterschiedlichen Möglichkeiten ihres Einsatzes statt. Der freie Zugang zu nötigen Technologien und die Dual-Use-Eigenschaften vieler Bauteile werden in Zukunft weiteren Akteuren einen Zugang zu Robotertechnik ermöglichen.

Damit sind aus sicherheitspolitischen Aspekten heraus grundsätzlich zwei sehr unterschiedliche Entwicklungstendenzen zu erwarten: (1) die weitere gezielte Anwendung von Robotik durch Streitkräfte im Rahmen militärischer Auseinandersetzungen sowie (2) die Verwendung von Robotik unterschiedlicher Art durch beliebige – auch nicht-staatliche – Akteure zu unter Umständen auch kriminellen oder terroristischen Aktivitäten.

Die drei folgenden Szenarios liefern plausible Beispiele für mögliche Anwendungen.

Szenario 1

Eine der modernsten deutschen Fregatten befindet sich in Begleitung zweier Einheiten – darunter einer Versorgungseinheit – auf dem Weg ins Einsatzgebiet, um dort zu

einer europäischen Trägergruppe zu stoßen, die es zu schützen gilt. Während des Transits blockieren zuerst auf der Versorgungseinheit und dann auf der Fregatte die Antriebswellen. Da ein technischer Defekt ausgeschlossen werden kann, vermutet man zunächst treibende Fischernetze, die sich in den Schrauben und Wellen der Schiffe verfangen und festgesetzt haben. Tauchgänge zum Beseitigen der Netze aus den Wellen ergeben jedoch, dass die Wellen beider betroffenen Einheiten zum Teil angefressen, zum Teil mit den Wellenböcken verschweißt zu sein scheinen. Da eine Weiterfahrt beider Schiffe nicht mehr möglich ist, müssen der Auftrag abgebrochen und die Schiffe für weitere Untersuchungen in den nächsten Hafen geschleppt werden. Nach einigen Wochen steht fest, dass die Ursache mikroskopisch kleine schwarmbildende Roboter waren, die sich an die Wellen geheftet und diese durch Säure beziehungsweise schmelzende Substanzen blockiert haben. Geheimdienstinformationen bestätigten später, dass die Schwarmroboter mittels fischähnlicher Roboter bis an den Schiffsverband herangeführt und dort in das Wasser entlassen worden waren.

In diesem Szenario werden die im Kapitel Miniaturisierung eingeführten *ChemBots* wirkungsvoll im Schwarm eingesetzt. Diese neuen Systeme bieten Möglichkeiten des Einsatzes nichtletaler Wirkmittel, die weit jenseits der heute gebräuchlichen liegen werden. Besonderes Augenmerk sollte auf die Tatsache gelegt werden, dass die Identifizierung der Roboter erst deutlich nach dem erfolgten Angriff erfolgte. Über die im Szenario skizzierte Lage hinaus könnten *ChemBots* aber auch weitere Möglichkeiten des Einsatzes bieten, zum Beispiel im Rahmen von Aufklärungsoperationen. Vorstellbar wäre in einem solchen Szenario

unter anderem ein Zersetzen von Gummierungen an Türen, Luken oder Fenstern, um für nachfolgende Aufklärungsmittel den Weg zu öffnen. Ein weiteres plausibles Beispiel wäre der Einsatz von *ChemBots* bei ad hoc Reparaturen von beschädigtem Gerät, wenn solche Roboter Mittel zum Abdichten enthielten oder Substanzen, die Stoffe dazu anregen, sich selbst zu heilen.

Ein zweites Szenario lehnt sich an Daten an, die Forscher des *Fraunhofer Institutes für intelligente Analyse- und Informationssysteme (IAIS)* verwendet haben.³⁷

Szenario 2

Pressemitteilung der International Conference of Advanced Nanotechnology: «*Der Forschergruppe um Prof. Minion ist es gelungen, erstmals humanverträgliche Nanoroboter zu entwickeln, die sich gezielt durch Blutbahnen fortbewegen und an unterschiedliche Zellen des Nervensystems andocken können. Zusätzlich können sie eine beliebige Substanz in ihrem Inneren versiegeln und diese nach Funkbefehl wieder freigeben. Durch Modifikationen der Wellenlänge ist es auch möglich, Gruppen von Robotern einzeln auszulösen.*» Einer Gruppe Terroristen gelingt es kurz nach der Veröffentlichung dieser Meldung in der Tagespresse durch einen öffentlichkeitswirksamen Sabotageakt die vorgestellten biofluidischen NanoBots in ihre Hände zu bekommen. Die Terroristen befüllen die NanoBots mit einem Nervengift und verbreiten sie verdeckt über die Trinkwassernetze in den Hauptstädten der zehn größten Industrienationen. Große Teile der Bevölkerung werden so schleichend infiziert. Nach einer gewissen Infektionszeit wird einem Teil der Bevölkerung zur Durchsetzung politischer Ziele kollektiv mit

Vergiftung gedroht, was landesweit zu Panik und zu Unruhen führt. Die Wissenschaftler der Entdeckerforschungsgruppe kennen keine Detektionsmethode, die eine Identifikation der identifizierten Personen gefahrlos ermöglicht. Die betroffenen Regierungen fühlen sich machtlos und berufen den Sicherheitsrat ein.

Das Szenario verdeutlicht anschaulich das Ergebnis der IAIS-Simulation eines durchaus realistischen Risikos einer zeitlichen Lücke zwischen der Verfügbarkeit von Robotern als Waffe einerseits und der Fertigstellung entsprechender Detektionsgeräte beziehungsweise der Möglichkeit, eingesetzte Systeme aufzuhalten oder zu neutralisieren.

Ein drittes Szenario beschreibt den Einsatz insektengroßer NAV zum Aufklären gegnerischer Einsatzbesprechungen.

Szenario 3

In einer urbanen Konfliktsituation hat sich eine militärische Einheit in einen verlassenen Häuserblock zurückgezogen. Bei einer Lagebesprechung in einem der besetzten Räume wird das taktische Vorgehen der nächsten Stunden erörtert. Nach einer kurzen Ruhephase für die Soldaten beginnt die besprochene Operation bereits zwei Stunden später. Das parallele Vorrücken in mehreren Gruppen kommt jedoch schnell ins Stocken, da man an allen einzunehmenden Schlüsselpositionen auf unerwartet heftigen Widerstand stößt. Der Gegner scheint über alle geplanten Bewegungen informiert gewesen zu sein und entsprechend Hinterhalte gelegt zu haben. Die Operation muss abgebrochen werden, die Gruppen ziehen sich in den Häuserblock zurück, in dem die Lagebesprechung stattgefunden hatte. Bei einer Untersuchung

der Räumlichkeiten stoßen die Soldaten auf Spuren eines vermutlich vom Gegner installiertes selbstorganisierendes Netzwerk aus fliegenden Nanorobots in Insektengröße, die sowohl akustische als auch visuelle Daten übertragen haben könnten. Folgende intensivere Untersuchungen bestätigen die Vermutung.

Aufklärung in urbanen Operationen stellt aufgrund der äußeren Rahmenbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Verschiedene Streitkräfte versuchen seit geraumer Zeit, für diesen Einsatztyp optimierte, mobile, im Idealfall sich selbst vernetzende Kleinstroboter zu entwickeln. Szenario 3 zeigt, wie einfach und doch effektiv Nanorobots, aufgrund fehlender Detektionsmöglichkeiten sowie zusätzlich gefördert durch ein fehlendes Bewusstsein (awareness) für eine Bedrohung durch Roboter, militärische Operationen behindern und Menschenleben gefährden können.

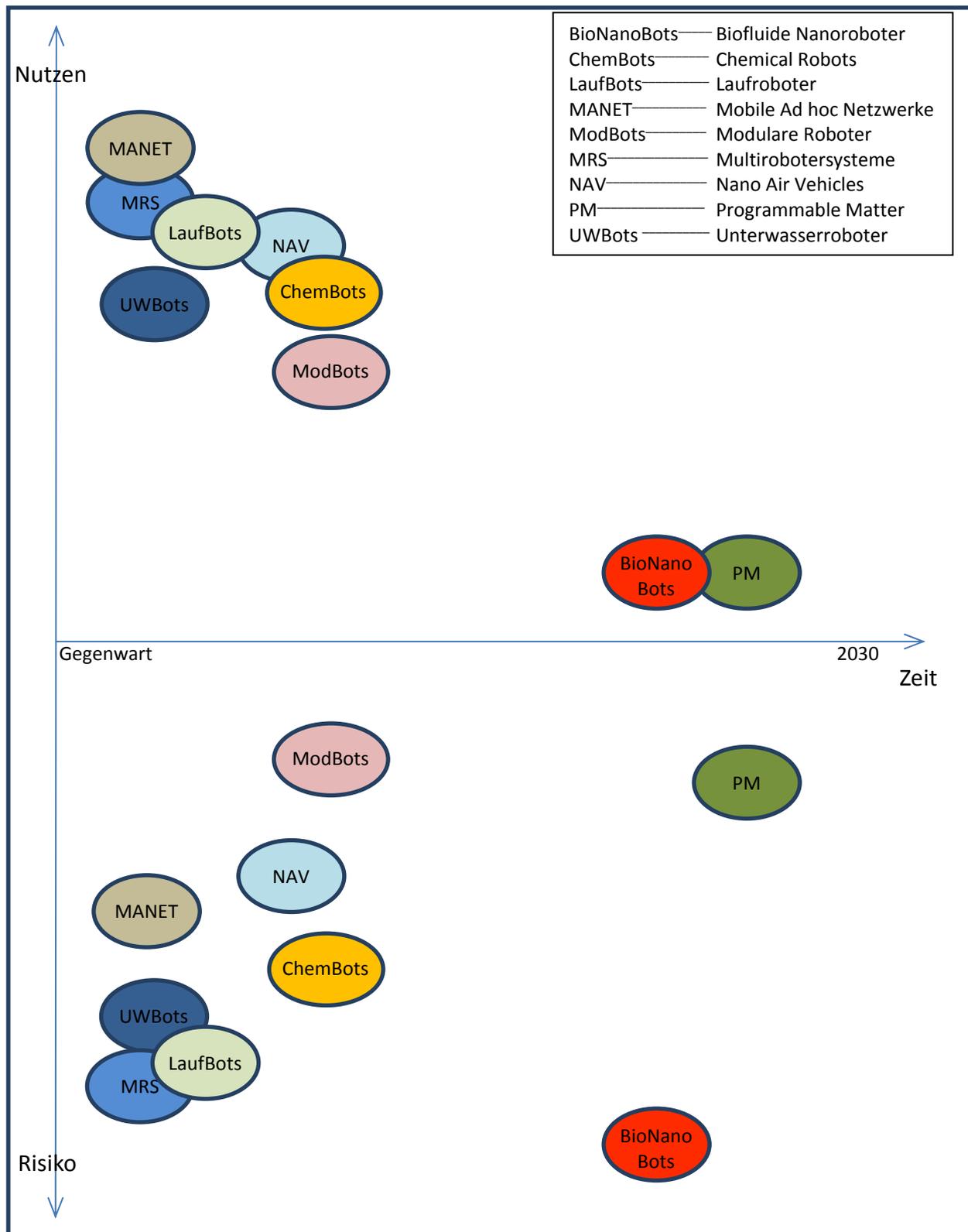
Als ein wichtiges Fazit der drei geschilderten Szenarien gilt es festzuhalten, dass bei der Entwicklung neuer Robotertypen beziehungsweise -generationen stets gleichzeitig auch eine Strategie zu ihrer Detektion und gegebenenfalls Verteidigung gegen sie mitgedacht werden muss.

Den letzten Aspekt aufgreifend stellt Abbildung 5 (siehe Seite 16) aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse und entsprechender Daten aus der Literatur eine Ab-

schätzung des Nutzens für eigene Zwecke beziehungsweise des Risikos eines gegnerischen Angriffes durch die im Future Topic beschriebenen Roboter zusammen. Für biofluide NanoBots zeigt die Grafik beispielsweise, dass deren Verfügbarkeit erst in circa 10 bis 15 Jahren zu erwarten sein wird. Ihr Nutzungspotenzial für Deutschland oder für die Bundeswehr wird dabei unter anderem aus Gründen einer anzunehmenden, selbstaufgelegten Zurückhaltung als eher gering bewertet, wohingegen das Risikopotenzial, das sich aus ihrem Einsatz gegen Deutschland oder gegen die Bundeswehr ergeben könnte, als ungleich höher einzustufen ist.

Es ist generell davon auszugehen, dass mit Beginn der Verfügbarkeit eines Robotersystems zugleich auch das Risiko, von einem solchen angegriffen zu werden, steigt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass dieses Risiko zeitlich gegebenenfalls deutlich vor einer eigenen Nutzungsmöglichkeit eintreten kann, wenn einem anderen Akteur ein neuartiger Roboter zu einem früheren Zeitpunkt zur Verfügung steht. Gleiches gilt im übertragenden Sinne auch für entsprechende Abwehr- oder Gegenmaßnahmen, so diese nicht parallel entwickelt worden sind.

Abbildung 5: Schematische Darstellung des Nutzens bzw. des Risikos für Streitkräfte der im Future Topic beschriebenen Roboter. Gleichzeitig wurde die zeitliche Dimension des ungefähren Beginns einer Nutzung dargestellt.



Quelle: eigene Darstellung

Fazit

Insgesamt ist zu erwarten, dass mit entsprechenden Weiterentwicklungen der Robotik ein Mehrwert in allen Fähigkeitsdomänen – Aufklärung, Führung, Wirkung, Unterstützung – erzielt werden wird.

Etliche Systeme sind bereits in der Entwicklung oder sogar bereits in der Erprobung wie unter anderem die FuT-Vorhaben TULF³⁸ und StrAsRob³⁹ zur logistischen Unterstützung, wie Roboter zum Bergen Verwundeter⁴⁰, Roboter, die im Verbund wirken oder solche, die mobile Ad hoc Netzwerke⁴¹ aufbauen können. Weitere Nutzungsmöglichkeiten sind in den Szenarien 1 bis 3 angedeutet worden, hängen darüber hinaus aber von konkreten Forschungsergebnissen ab.

Große Systeme im Bereich Meta- und Makroebene werden durch Effekte der Miniaturisierung von einer generellen Verbesserung der Sensorik und Motorik sowie einer größeren Nutzlastkapazität (in Form zusätzlicher Sensoren, Effektoren oder allgemeiner Zuladungsmöglichkeit) profitieren. Damit können bereits bestehenden Systeme weiter optimiert werden, und ihre Anwendung zum Beispiel in den Bereichen Führungsunterstützung, Sanitätswesen und Logistik ausgeweitet werden.

Auf der Ebene von Meso- und Mikrosystemen werden die Bereiche Aufklärung und Unterstützung durch erweiterte und neue Möglichkeiten, Räume zu erschließen und zu überwachen, profitieren. Im Bereich Wirkung werden die neuen Technologien Möglichkeiten eröffnen, neue Formen von Wirkung – zum Beispiel als gezielte Manipulation – zu erzielen und damit das Spektrum nichtletaler Wirkmittel zu erweitern. Eine autonome Entscheidung zum Waffeneinsatz allein aufgrund einer „Computer-

oder Maschinenlogik“ wird für die Bundeswehr ausgeschlossen. Anders herum ist jedoch davon auszugehen, dass bewaffnete autonome Roboter gegen eigene Kräfte eingesetzt werden könnten (z.B. Roboter Suicide Attack).

Um abschließend noch einmal auf den Auszug aus Asimovs Kurzgeschichte „Runaround“ zu Beginn dieses Future Topic und den dort handelnden humanoiden Robotern zurückzukommen: In Diskussionen um das Thema KI im Verbund mit KR und ER wird immer wieder auch die Frage aufgeworfen, ob oder wann es menschenähnliche Roboter mit eigenem Bewusstsein geben wird.

Diese Frage kann hier nicht beantwortet werden. Neben der Klärung der Interaktion zwischen Mensch und Roboter und dem Definieren von Regeln für das Miteinander, stellt sich für Streitkräfte darüber hinaus prinzipiell die grundsätzliche Frage, ob es überhaupt sinnvoll wäre, ein hochkomplexes humanoides System einzusetzen.

Endnotenverzeichnis

- ¹ Assimov (2004: 50-51).
- ² Vgl. Proyas (2004).
- ³ Vgl. Penniman (2013); Schulenburg (2007); Swade (1993: 78).
- ⁴ Vgl. Günthner/Heptner (2007:68-69); Nordmann (2010).
- ⁵ MALE ist die Abkürzung für Medium Altitude Long Endurance.
- ⁶ Unter autonomen Systemen werden in diesem Zusammenhang Systeme verstanden, die eigenständig eine vorher programmierte Aufgabe erfüllen (z.B. Überwachung eines Zaunes und Meldung von ungewöhnlichen Vorkommen an die Zentrale).
- ⁷ Unter teilautonomen Systemen werden in diesem Zusammenhang Systeme verstanden, die unter Kontrolle und teilweiser Fernsteuerung eines Menschen vorher programmierte Aufgaben erfüllen (z.B. Reinigung eines Tankes, Mensch steuert wo gereinigt wird, Reinigung nach Programm).
- ⁸ Bis 2013 soll jeder Haushalt in Südkorea einen Roboter besitzen.
- ⁹ Vgl. persönliches Gespräch beim Berliner Circle am 11.12.2012 der Stiftung Neue Verantwortung in Berlin.
- ¹⁰ Vgl. Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (2013); Huppertz et al. (2010); Stieler (2012a: 26-32).
- ¹¹ Vgl. Berres (2012); Stieler (2012a: 26-32); (2012b: 26-34); Weber (2012).
- ¹² Vgl. Botthof/Bovenshulte (2011: 1-9).
- ¹³ Im Jahr 1950 entwickelte Alan Turing in seiner Arbeit "Computing Machinery and Intelligence" unter anderem einen Testverfahren, um der Frage nachzugehen, ob Maschinen in der Lage sind, menschliches Denken nachzuahmen. Im Wesentlichen ging Turing von folgendem aus: Wenn die Antworten eines Computers nicht mehr von den Antworten eines Menschen unterscheidbar sind, verfügt der Computer über künstliche Intelligenz. Der Turing Test existiert in vielen verschiedenen Varianten.
- ¹⁴ Unter Kognition versteht man informationsverarbeitende Prozesse, die mit Wahrnehmung, Erkennen, Beurteilen und Bewerten von Situationen zusammenhängen.
- ¹⁵ Zwei wichtige Forschungsplattformen sind der iCub des europäischen RobotCub-Projektes und der japanische CB2-Roboter.

-
- ¹⁶ Vgl. Huppertz et al. (2010); Kernchen (2011: 90); Kremp (2012); Stieler (2012b: 26-34).
- ¹⁷ Vgl. Albus (2009: 10-17); Huppertz et al. (2010); Mock et al. (2009).
- ¹⁸ Der Aufbau kann aus einfachen neuronalen Netzwerken bestehen, die Sensorwerte empfangen und als Steuersignale an einen Effektor ausgeben.
- ¹⁹ Müller (2011: 74).
- ²⁰ Gleiche Roboter die mit einer gleichen Software ausgestattet sind.
- ²¹ Gleiche oder verschiedene Roboter die mit einer unterschiedlichen Software ausgestattet sind.
- ²² Ein Fischschwarm benötigt drei Regeln: (1) Folge dem Fisch vor dir. (2) Halte die ungefähre Geschwindigkeit des Fisches neben dir. (3) Vermeide Kollisionen.
- ²³ Huppertz et al. (2010); Müller (2011); Stieler (2012b: 26-34); Weiss (2011:854-874).
- ²⁴ Vgl. Internetseite der Fraunhofer Allianz Nanotechnologie (2013).
- ²⁵ Vgl. Paschen (2003: 329-368); Fleischer (2012).
- ²⁶ Vgl. Huppertz (2012: 107).
- ²⁷ Vgl. Huppertz (2012: 50); Projektseite der Defense Advanced Research Projects Agency, Defense Sciences Office – Program Chemical Robots (2013).
- ²⁸ Vgl. Huppertz (2012: 51).
- ²⁹ Vgl. Projektseite des Claytronics Project - Collaborative Research in Programmable Matter der Carnegie Mellon University und Intel (2013).
- ³⁰ Vgl. Huppertz (2012: 54).
- ³¹ Vgl. Projektseite des Millibiology Project des Massachusetts Institute of Technology USA (2013a).
- ³² Vgl. Projektseite des Distributed Robotics Laboratory des Massachusetts Institute of Technology USA (2013b).
- ³³ Vgl. Projektseite des Cornell Creative Machines Lab der Cornell Universität New York (2013).
- ³⁴ Überwasserroboter werden nicht betrachtet, da sie aufgrund der extremen Umweltbedingungen an der Wasseroberfläche sich nicht prädestiniert für die Verkleinerung des Gesamtsystems eignen.
- ³⁵ Als ein Beispiel sind Adhäsionskräfte zu nennen, die ein Anlagern an die Zellwände bewirken würden.

-
- ³⁶ Die Kinematik ist die Lehre von der Bewegung von Körpern im Raum ohne Berücksichtigung der wirkenden Kräfte.
- ³⁷ Vgl. Vortrag von Uwe Beier vom Fraunhofer Institutes für intelligente Analyse- und Informationssysteme im August 2012 im Zentrum für Transformation der Bundeswehr, Nachfolgeorganisation: Planungsamt der Bundeswehr.
- ³⁸ Vgl. Bundeswehr FuT Vorhaben Stufe 2 Technologieträger Unbemanntes Land-Fahrzeug (TULF). Projektleitung liegt beim BAAINBw K1.1.
- ³⁹ Vgl. Bundeswehr FuT Vorhaben Stufe 3 Straßentransport im Einsatz mit Assistenzfunktionen von Robotern (StrAsRob). Projektleitung liegt beim BAAINBw U6.2.
- ⁴⁰ Vgl. Battlefield Extraction-Assist Robot (BEAR) der United States Army (2010).
- ⁴¹ MANET - Mobile Ad hoc Netzwerke sind Funknetze die sich aus zwei oder mehreren verbundenen Endgeräten selbständig aufbauen und konfigurieren.