

Roboter werden selbstständig

© Richard Greenhill and Hugo Elias,
Wikimedia Commons



Gegen Ende der 1990er-Jahre startete Japan eine weltweit einzigartige Welle der Förderung der humanoiden Robotik. Die Motivation war klar formuliert: Die demographische Entwicklung mit steigender Lebenserwartung bei stagnierender bzw. sinkender Bevölkerungszahl in den hochentwickelten Ländern wird in absehbarer Zukunft Probleme bei der Versorgung älterer Menschen bereiten, angesichts einer relativ stark schwindenden Anzahl Jüngerer, die den Älteren im Lebensalltag helfen können. Autonome Roboter sind hier ein möglicher Ausweg und Autokonzerne wie *Honda* und *Toyota* investierten Milliarden in einen potenziell neuen Industriezweig.

Ca. 15 Jahre später, also heutzutage, hat sich die Herausforderung der „alternden Gesellschaften“ nicht geändert und auch Europa und die USA haben genau dieses Problem benannt und betont. Aber auch neue Herausforderungen haben sich abgezeichnet. Erdbeben und Flutwellen verursachen unvorstellbaren Schaden in dicht besiedelten Wohngebieten. Und der anhaltende Klimawandel auf der Welt könnte zunehmend weitere Naturkatastrophen auslösen. Eine weitere ständige Gefahr von sich schnell ausbreitenden Epidemien wurde in jüngster Zeit durch Ebola deutlich.

Eine Hoffnung für die Zukunft ist, dass es einmal autonome technische Helfer geben könnte, d.h. autonome Roboter, die in allen diesen Bereichen Hilfestellung geben könnten. Visionen für solche autonomen Systeme gehen natürlich weit über die relativ naheliegenden Ideen der humanoiden Robotik hinaus. Das Spektrum umspannt hier von der Nanorobotik bis hin zur Industrierobotik alle Längenskalen. Spielzeugroboter, Roboter, die emotionale Unterstützung geben können oder Miniaturroboter, die direkt im Körper klinische Aufgaben durchführen können, sind hier unter anderem denkbar.

Der Stand der Wissenschaft und Technik liegt jedoch noch weit hinter solchen Hoffnungen zurück. Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima war kein Roboter im Einsatz zu finden, der sinnvolle Hilfe leisten konnte. Und das trotz einer rasanten Entwicklung in der Mechatronik, die speziell in Japan tausende von Roboterprototypen produzierte. Während der gegenwärtigen Ebola-Epidemie sind weiterhin Menschen den ansteckenden Viren bei Säuberungs- und Aufräumarbeiten ausgesetzt. Das sind Aufgaben, die durchaus autonom und ohne Menschen durchführbar wären. Und die Nanorobotik für klinische Zwecke ist noch absolute Grundlagenforschung.

Heute kann man die ersten einfachen autonomen Roboter in Privathaushalten finden (Staubsauger, Rasenmäher), in der militärischen Aufklärung im schwierigen Gelände, in fahrerlosen Autos und im Drohneneinsatz. Dies sind im Wesentlichen mobile Roboter, d.h. auf Rädern oder in der Luft, ohne Arme oder Greifer für Handhabungsaufgaben. Roboter, die auf Beinen im unebenen Gelände laufen oder komplexere Manipulationsaufgaben durchführen können, sind noch im Forschungsstadium. Humanoide Roboter und Assistenzroboter werden weltweit erforscht. Die Komplexität von Wahrnehmung, kompetenter Steuerung ohne die Umgebung zu gefährden und das weitgehende Fehlen von Lern- und Anpassungsfähigkeiten auf sich ändernde Umgebungen stellen der Forschung jedoch weiterhin große Zukunftsaufgaben. Damit bleibt das Verstehen von autonomen Systemen weitgehend ein Thema der Grundlagenforschung.

AUTONOME ROBOTIK: PERCEPTION-ACTION-LEARNING

Autonome Systeme können allgemein als „Perception-Action-Learning“-Systeme charakterisiert werden. Solche Systeme sollen für längere Zeit autonom, also ohne externe

Hilfe, sinnvolle Aufgaben durchführen können. In der Robotik ist solch ein System physisch realisiert und kann physische Handlungen ausführen. Sensoren erlauben es dem System, die Umwelt und den eigenen Körper wahrzunehmen. Lern- und Adaptionsmechanismen bieten die Möglichkeit, sich auf ändernde Umgebungen anzupassen oder komplett neue Verhaltensweisen zu erlernen. Das System muss robust und unfallfrei auf sich verändernde Situationen und Störungen reagieren können.

Es ist schwierig, autonome Roboter einfach einer speziellen Disziplin zuzuordnen, wie zum Beispiel der künstlichen Intelligenz (KI), der Mechatronikforschung oder dem maschinellen Lernen (ML). Vielmehr bedarf es sehr vieler Komponenten, die alle miteinander harmonisieren müssen, um zusammen ein robustes Verhalten zu erzeugen, wie z. B. Wahrnehmung, Steuerung, Planung und Lernverfahren. Somit ergibt sich auch eine Herausforderung bei der Zuverlässigkeit solcher Systeme: Verkettet man beispielsweise zehn Komponenten mit jeweils 99 % Robustheit, dann ist das Gesamtverhalten des Systems nur noch mit 90 % Wahrscheinlichkeit zuverlässig.

Im täglichen Gebrauch wäre solch ein System nicht tragbar. Zum gegenwärtigen Stand der Forschung ist 100% Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten jedoch im wesentlichen nur mit analytischen Methoden möglich, d.h., Methoden, die über mathematische Modellbildungen abgeleitet werden können. Empirische Methoden, also Verfahren, die datengetrieben durch maschinelles Lernen hergeleitet werden, erreichen kaum diese Zuverlässigkeit. Somit ergibt sich ein komplexes Problem: komplizierte Robotersysteme haben keine zuverlässige Modellbildung, und empirische Methoden sind bisher nicht genügend akkurat, um analytische Modelle zu umgehen. Eine aktuelle Fragestellung der Forschung ist, herauszufinden, welche Systemkomponenten mit maschinellem Lernen abzudecken sind, aber auch neue analytische Methoden zu finden, die gegenüber inakkuraten Modellen mehr Robustheit zeigen. Nachdem das Erlernen von neuem Verhalten bei Robotern oft sehr zeitaufwendig ist, sind auch Ideen im Gespräch, wie man mittels Cloud-Computing eine weltweite Datenbank und zentrale Computing-Zentren für Robotik aufbauen könnte. Dies scheint speziell für Wahrnehmungsaufgaben vielversprechend, jedoch nicht so sehr für die direkten Steuersignale von Robotern, die sehr systemspezifisch sind und Echtzeitverarbeitung benötigen.

Als Fazit ergibt sich, dass die autonome Robotik eine sehr breite Wissensbasis benötigt, jenseits der üblichen und eng definierten Standards der beitragenden Kerndisziplinen.

Es sind weniger die Spezialisten aus einem Fachgebiet gefragt, sondern vielmehr diejenigen, die auf vielen Fachgebieten gleichzeitig arbeiten und Brücken schlagen können. Es wären also Wissenschaftler gefragt, die sich gleichzeitig mit Mechanik, Physik, Elektrotechnik, Computer Vision, Regeltechnik, maschinellem Lernen, Künstlicher Intelligenz und Software-Engineering auskennen. Ein Interesse an Kognitionswissenschaften wäre zudem hilfreich bzw. Wissen über die Neurowissenschaften, wenn es um die Nachahmung biologischer Systeme geht. Bisher finden sich nur wenige Forscherinnen und Forscher solchen Profils in der Welt, und es gibt auch kaum Ausbildungsmöglichkeiten, die solch ein breites Wissen vermitteln.

EINE SKIZZE DES STANDS DER FORSCHUNG

Mobile Systeme: Die mobile Robotik ist im Bereich Autonomie sicherlich am weitesten fortgeschritten. Mobile Roboter, bis auf wenige Ausnahmen alle auf Rädern und nicht auf Beinen, sind Standardforschungsthemen in vielen Informatiklaboren. Dieses Thema war speziell in den 1990er Jahren in der Forschung populär und hatte ca. um 2005 einen Durchbruch durch die DARPA Grand Challenge, einen Wettbewerb der autonomen Fahrzeugnavigation. Dass in der Grand Challenge sechs Teams mit nicht sehr großen Zeitunterschieden das Ziel erreichten, zeigte, dass die Forschung und Technik auf diesem Gebiet doch recht fortgeschritten war. Gute Systemintegration, Software-Engineering und gute Qualitätskontrolle standen eher im Vordergrund als Algorithmen — die meisten Komponenten für die autonome Navigation waren zu diesem Zeitpunkt schon gut bekannt. Es ist deshalb vermutlich festzuhalten, dass die autonome Navigation auf Rädern die Forschungslabore langsam verlassen hat und nun durch Technologietransfer zur Industrie übergegangen ist.

Assistenz-Robotik und Humanoide Robotik: Ganz anders dagegen ist der Stand der autonomen Manipulationsroboter, also Roboter mit Armen, Händen und Beinen, zu denen auch humanoide Roboter gehören. Die Navigation im zweidimensionalen Raum mit Fahrzeugen ist ein vergleichsweise einfaches Problem und sehr strukturiert durch die Umwelt (Straßen, Korridore, Verkehrszeichen, Wände, usw.). Daher ist das Ziel der Navigation einfach definiert, nämlich einen Zielort zu erreichen und Unfälle zu vermeiden. Solche Szenarien sind heute recht gut mit maschinellem Lernen oder Künstlicher Intelligenz zu bewältigen. Im Gegensatz dazu sind Manipulationsroboter hochdimensionale Systeme, oft mit mehr als 50 Regelungsdimensionen und nichtintuitiven geometrischen Räumen für die Planung und Regelung. Zum Beispiel hat ein humanoider Roboter oft sieben Freiheitsgrade pro Arm und

Bein und darüber hinaus 10-20 zusätzliche Freiheitsgrade für Körper, Finger und Kopf. Viele Methoden des maschinellen Lernens und der Künstlichen Intelligenz sind für niedrigdimensionale Räume entwickelt und können nicht für hochdimensionale Räume berechnet werden, der Rechenaufwand, in diesen Räumen zu planen und zu optimieren, wächst exponentiell mit der Anzahl der Raumdimensionen. Oft ist es nicht einmal möglich, in ausreichender Zeit genug Daten zu sammeln, um in diesen Räumen empirisch arbeiten zu können – der Prozess des Datensammelns in Echtzeit ist einfach zu langsam, um hochdimensionale Räume auch nur annähernd genau zu berechnen, selbst nach 100 Jahren ununterbrochenen Betrieb eines Roboters. Somit ist eine Mischung von analytischen und empirischen Methoden augenblicklich der sinnvollste Weg, kompetentes Verhalten zu erzeugen. Wenn gute mathematische Modelle existieren, kann man oft mit diesen Modellen effizienter arbeiten als mit Modellen, die erst empirisch durch Daten erlernt werden müssen.

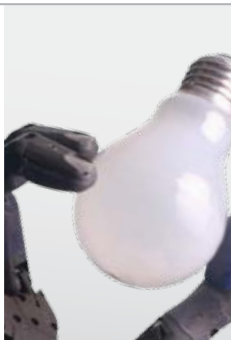
Der derzeitige Stand der Forschung ist, dass komplexes Verhalten wie Manipulationsaufgaben, Fortbewegung auf Beinen oder Ganzkörpermanipulationen noch viel manuelle Programmierung benötigt. Damit beispielsweise der Roboter eine Tasse aus dem Küchenschrank holt, unterteilen die Wissenschaftler die Gesamtaufgabe in einzelne Unteraufgaben (z.B. „in die Küche gehen“, „den Schrank finden“, „die Schranktür öffnen“, „die Tasse greifen“, usw.) und definieren die Abfolge, in denen sie durchgeführt werden. Dann wird das Verhalten des Roboters für die einzelnen Unteraufgaben durch Programmieren und/oder durch Lernverfahren erzeugt. Oft ergeben sich Robustheitsprobleme in der Wahrnehmung, der Steuerung des Roboters und den verwendeten Algorithmen und es bedarf einiger Zusatzverhalten, um Fehler zu korrigieren. Oft ist es nicht klar, wie das Ziel eines Verhaltens mathematisch formuliert werden kann. Was bedeutet es zum Beispiel mathematisch „mit einem Löffel die Suppe umzurühren“? Schnell kommt es damit zu sehr speziellen Lösungen für eine Verhaltensaufgabe, die weder robust, noch auf andere Aufgaben oder andere Roboter übertragbar sind. Kleine Änderungen in der Umwelt oder der Kalibrierung des Roboters führen dann zu komplettem Fehlverhalten.

Wirklich autonomes Verhalten bei Manipulationsrobotern ist damit sehr weit von der Realisierung entfernt. Gewisse autonome Verhaltensweisen sind erzielbar, wie z. B. das Balancieren und Gehen auf zwei Beinen im ebenen Gelände oder Greifbewegungen von verschiedenen Gegenständen. Oft wird derzeit auch der Begriff des „semiautonomen Verhaltens“ angeführt, das bedeutet, dass ein kurzes Bewegungs-

verhalten autonom durchgeführt wird und dann ein Mensch das nächste Ziel und das passende Verhalten bestimmt. Die Hoffnung nach autonomen Roboter-Helfern in der Gesellschaft, wie sie weiter oben als Vision beschrieben wurde, ist also noch sehr weit von der Realität entfernt.

Mikro- und Nano-Robotik: Verkleinert man die Längenskalen von Robotern hin zu Zentimetern, Millimetern, Mikrometern oder sogar Nanometern, so ergeben sich völlig neue Herausforderungen. Auf diesen Ebenen dominieren andere physikalische Gesetze als auf der Größenordnung von Menschen. Ist die Mechanik eines menschenähnlichen Systems im Wesentlichen von Trägheitskräften geprägt, so stehen auf der Zentimeter- und Millimeterebene Reibungskräfte und Oberflächenspannung viel mehr im Vordergrund. Das ist, zum Beispiel, der Grund, dass einige Insekten im Gegensatz zum Menschen über Wasser laufen können. Auf der Mikrometerebene sorgt das dafür, dass eine intelligente Schwimmtechnik in Flüssigkeiten mit einer korkenzieherartigen Bewegung wesentlich effizienter ist, als etwa eine Flossenbewegung von Fischen. Geht man auf der Größenskala noch weiter nach unten, dann dominieren durch Wahrscheinlichkeiten gesteuerte Einflüsse, so dass Verhaltensziele nur noch in Schwärmen von vielen Systemen, und auch nur noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu realisieren sind.

OFT IST ES NICHT KLAR, WIE DAS ZIEL EINES VERHALTENS MATHEMATISCH FORMULIERT WERDEN KANN. WAS BEDEUTET ES ZUM BEISPIEL MATHEMATISCH „MIT EINEM LÖFFEL DIE SUPPE UMZURÜHREN“?



Auch die Sensorik und die Motorik sind auf kleinen Längen anders. Die Sensorik wird oft eher über chemische Prozesse verwirklicht. Motorik und Energieversorgung werden komplexe Probleme, so dass häufig in der Forschung ein externer Antrieb notwendig ist, wie zum Beispiel durch Magnetfelder oder Rasterkraftmikroskope. Batterien sind auf der Mikro- und Nanoebene völlig ineffizient. Und es bleibt weiterhin unklar, welche Informationsverarbeitungsprozesse auf solch kleinen Ebenen überhaupt zu verwirklichen sind. In diesem Mikro- und Nanobereich sind autonome Robotiksysteme noch völlig im Bereich der Grundlagenforschung.

Autonome Wahrnehmung: Die Welt zu erkennen, zu verstehen und Handlungsmöglichkeiten aus ihr herzuleiten, das ist ein wesentliches Thema der Wahrnehmung. Computer Vision (also die Simulation des Sehens durch Rechner) hat in den letzten Jahren sehr große Fortschritte erzielt. Zum einen weil Kamerasysteme zu geringen Kosten zu erhalten sind, so dass nahezu jeder, der gerne mit Kameras arbeiten möchte, das einfach umsetzen kann, zum anderen weil gängige Computer so schnell geworden sind, dass selbst eine komplexe Bildverarbeitung auf einem Laptop machbar ist.



**DURCH DIE NAHEZU UNENDLICH VIELEN BILDER
IM INTERNET GIBT ES EIN UNERSCHÖPFLICHES
RESERVOIR VON LERNDATEN.**

Szenen zu kategorisieren und Objekte und Gesichter zu erkennen, ist sehr weit fortgeschritten. Durch die nahezu unendlich vielen Bilder im Internet gibt es ein unerschöpfliches Reservoir von Lerndaten. Wenn dies noch mit großen Rechnernetzwerken verbunden wird, können Lernsysteme trainiert werden, die exzellente Qualität erreichen. Das wird augenblicklich intensiv mit Deep Learning bearbeitet, einer neuen Entwicklungsrichtung des Maschinellen Lernens mit vielschichtigen neuronalen Netzen und verbesserten Lernverfahren, die stark von Großrechenanlagen profitieren.

„Action Recognition“, also das Erkennen von Handlungen, ist ein weiteres Thema, das viel Aufmerksamkeit erhält. Speziell geht es oft darum, menschliche Bewegungen zu erkennen und dann die Absicht dieser Bewegungen zu verstehen. Es ist relativ einfach, eine Fortbewegung auf zwei Beinen zu erkennen. Zu Erkennen, ob eine Person Fußball spielt oder einfach nur am Joggen ist, ist dagegen schon wesentlich komplizierter. Was die Wissenschaftler gern erreichen wollen, ist, jede Art von Handlung zu verstehen, wie zum Beispiel das Greifen einer Tasse, das Essen mit einer Gabel, das Spielen mit Bauklötzen. Diese Fähigkeit ist essenziell, wenn autonome Roboter in menschlichen Umgebungen und mit Menschen interagieren sollen.

Es gibt natürlich auch eine andere Wahrnehmungssensorik: Berührungssensoren, Kraftsensoren, Mikrophone, usw. können wertvolle Daten liefern, die andere sensorische Modalitäten ergänzen. Die menschliche Wahrnehmung ist vermutlich deswegen so erfolgreich, weil sie sehr viele Modalitäten

integriert, so dass wir uns selten auf nur eine Modalität verlassen müssen. Dieses Fusionieren von Sensoren ist Teil der Forschung, jedoch leider nicht sehr ausgeprägt in den gegenwärtigen Projekten vorhanden.

Ein großes Problem bleibt aber, diese Informationsverarbeitung robust zu gestalten, so dass Variablen wie andere Lichtverhältnisse, der Lärm einer Baustelle, der gefühlsmäßige Unterschied von einer Plastiktasse zu einer Porzellantasse oder ähnliches das Wahrnehmungssystem nicht zum Scheitern bringen. Robuste autonome Wahrnehmung ist daher sicherlich eines der großen Probleme für die autonome Robotik.

Lernsysteme, Planungssysteme und Künstliche Intelligenz: Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von Algorithmen, die Planungsaufgaben und Lernaufgaben ermöglichen. Zu wissen, wann welcher Algorithmus anwendbar ist, was seine Schwachstellen und Stärken sind und wie er effizient einsetzbar ist, bleibt weitgehend das Wissen von erfahrenen Experten. Die Hoffnung der Wissenschaft ist natürlich, generelle „Black Box“-Systeme zu erzeugen, d.h. Systeme, die mit 100 Prozent wissenschaftlicher Zuverlässigkeit ihre Aufgabe erfüllen, ohne dass der normale Benutzer verstehen muss, was sich im Inneren des Systems abspielt. Das ist bisher nicht umgesetzt und vielleicht nicht einmal umsetzbar, da universale Lernsysteme (Systeme, die jede Aufgabe lernen können) theoretisch nicht realisierbar sind.

Jedoch besteht die Hoffnung, dass das Kreieren solcher „Black Box“-Systeme wenigstens in Spezialbereichen machbar wäre. Das bedarf dann Spezialisten, die sich sehr gut in der Künstlichen Intelligenzforschung, dem maschinellen Lernen und der Robotik und Wahrnehmung auskennen. Leider sind Spezialisten mit solch einem breiten Wissen bisher sehr selten. Die Ausbildung an Universitäten betont weiterhin Spezialisierungen wie Regelungstechnik, Computer Vision und Maschinelles Lernen. Nur wenige Fakultäten und Institute betonen eine Breitenausbildung in „Perception-Action-Learning“-Systemen.

Hardware-Entwicklungen: Die Hardware-Realisierung ist für autonome Roboter essenziell. Das Arbeiten mit richtigen Robotern und richtigen Sensoren in einer realen und komplexen Umgebung bringt Probleme mit sich, die nicht sinnvoll simulierbar sind. Die Qualität der Hardware spielt hier natürlich eine wichtige Rolle. Oft kreieren Hardwareprobleme die Notwendigkeit, Algorithmen zu verbessern oder komplett andere Strategien der autonomen Robotik zu verfolgen. Zum Beispiel sind die Positionssensoren von manchen Robotern

nicht ausreichend genau, um zu wissen, wo sich die Hand im 3D-Raum befindet. Dann benötigt man „Computer Vision“-Algorithmen, die die Hand durch 3D-Kamerabilder lokalisieren. Entwicklungen in der Mechatronik sind weiterhin gefragt, um zuverlässige Roboter mit hoher Qualität und Performanz zu erzeugen.

Bei Robotern in der Größenordnung von Nanometern bis Millimetern ist die Fabrikationstechnologie oft das beherrschende Forschungsthema. Mit Materialforschungsmethoden können Verfahren entwickelt werden, die Tausende von Robotern gleichzeitig generieren. Jedoch bleibt es Grundlagenforschung herauszufinden, welche Funktionen genau in diese Kleinst-Roboter integrierbar sind. Die Investition erfolgt hier oft in der Nanoverfahrenstechnik, die solche Fabrikationsprozesse ermöglicht und die viele Iterationen durchlaufen müssen, bis geeignete Systeme synthetisierbar sind.

Software-Entwicklungen: Passende Hardware ist natürlich die Voraussetzung für einen autonomen Roboter, jedoch kommt der Großteil der Autonomie aus Softwaresystemen. Und genau diese Softwaresysteme sind eines der Kernprobleme für die autonome Robotik, denn es gibt kaum standardisierte Softwaresysteme für die Robotik. Es ist relativ einfach, eine Robotikfunktion in einer Machbarkeitsstudie „irgendwie“ zu programmieren, so dass ein erfolgreiches Verhalten zumindest einmal erzeugt werden kann. Das ist auch das, was Forschungslabore und Universitäten meist realisieren. Ein robustes, autonomes System mit reproduzierbarem Verhalten, mit „Perception“- , „Action“- und „Learning“-Komponenten und mit komplexen Algorithmen wird jedoch schnell zu groß, um von „Software-Amateuren“ realisiert und gewartet zu werden. Richtiges Software-Engineering benötigt jedoch passendes Personal, d.h. Forscher, die sich sowohl mit Software Engineering, als auch dem Problem der autonomen Robotik auskennen. Softwarefehler können oft katastrophale Auswirkungen in der Robotik haben, und daher sind ganz andere und konservativere Methoden des Programmierens notwendig. Bedauerlicherweise gibt es nur wenige Experten, die dieses Wissen vereinen.

„Perception-Action-Learning“-Systeme: Abschließend zu diesen Erläuterungen, die den Stand der Forschung und Technik der autonomen Robotik betreffen, ist es wichtig, auch wieder auf die Grundlagen dieser Systeme hinzuweisen, der integrierten Perception-Action-Learning-Systeme. Alle drei Komponenten sind in einer geschlossenen Schleife miteinander verbunden. Somit sind solche Systeme nicht einfach in unabhängige Module zu unterteilen, da die Qualität eines Moduls leicht die

notwendige Funktionalität eines anderen Moduls beeinflusst. Die Hardware eines Roboters ist ebenfalls ein Bestandteil dieser Schleife, so dass die Software an die Hardware angepasst werden muss. Somit ist es nicht verwunderlich, dass jedes Projekt schnell sehr speziell wird und damit Wahrnehmungs-, Steuerungs- und Lernalgorithmen sehr spezifische Lösungen generieren, die nicht auf andere Robotersysteme übertragbar sind. Es bleibt deshalb ein großes Ziel von Forschung und Technik zu verstehen, mit welchen Bausteinen und komplexen Lernalgorithmen autonome Perception-Action-Learning-Systeme generell aufzubauen sind, damit sie sich an die jeweilige Hardware, Umgebung und Submodule von selbst anpassen, ähnlich wie das auch biologische Systeme bei einem ständig wachsenden und alternden Körper tun.

**RICHTIGES SOFTWARE-ENGINEERING BENÖTIGT
JEDOCH PASSENDES PERSONAL, D.H. FORSCHER,
DIE SICH SOWOHL MIT SOFTWARE-ENGINEERING,
ALS AUCH DEM PROBLEM DER AUTONOMEN ROBOTIK
AUSKENNEN.**



ZUSAMMENFASSUNG

In allen hochentwickelten Ländern dieser Welt sind Experten sich einig, dass Roboter, speziell autonome Roboter, in der nahen bis mittleren Zukunft im Alltag der menschlichen Gesellschaft zu finden sein werden. Es ist jedoch noch sehr viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit für solche Systeme notwendig. In allen Forschungsgebieten der autonomen Robotik, also Wahrnehmung, Steuerung, Anpassungsfähigkeit, Lernfähigkeit und Mechatronik, gibt es noch signifikante unbekannte Größen, die es augenblicklich noch nicht ermöglichen, robuste autonome Roboter für den Alltagseinsatz zu kreieren. Es bleibt eine Herausforderung an Grundlagenforschung und angewandte Forschung, allgemeine Bausteine für autonome Roboter zu entwickeln. Es bleibt auch eine Herausforderung an die Wissenschaftspolitik, die sehr interdisziplinäre und komplexe Forschung auf diesem Gebiet passend zu unterstützen.