



Tritt ROBOTER AMOS in ein Loch, fängt er an zu zappeln

Foto: Poornate Manoopong & Marc Timme, Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation

Die Kraft der zwei Zellen

Roboterforscher aus Göttingen haben ein erstaunlich einfaches Verfahren gefunden, um die Schritte autonomer Laufmaschinen zu steuern **VON CHRISTOPH DRÖSSER**

Wie viele Gehirnzellen braucht man, um die Fortbewegung eines sechsbeinigen Roboters zu kontrollieren? Die überraschende Antwort: zwei. Das jedenfalls kann man aus einem aktuellen Aufsatz in der Zeitschrift *Nature Physics* schließen.

Der Roboter, um den es geht, heißt Amos. Er sieht aus wie eine Spinne und kommt aus Göttingen. Beobachtet man Amos dabei, wie er über einen Testparcours krabbelt, wie er seine Lauftechnik verändert, wenn es bergauf geht, wie er Hindernisse umläuft und wild mit den Beinen strampelt, sobald eines seiner sechs Gliedmaßen in ein Loch gerät – dann fällt es schwer, das mit den zwei Zellen zu glauben. Gebaut haben den Roboter vier Wissenschaftler vom Göttinger Bernstein Zentrum Computational Neuroscience. Sie wollten wissen, warum Insekten mit ihren kleinen Gehirnen sich so viel eleganter durch die Welt bewegen als die technischen Geschöpfe der Ingenieure.

Ein klassischer Robotertechniker ist nur einer der vier, der gebürtige Thailänder Poornate Manoopong baute die Hardware der Krabbelmaschine. Aus der Neurowissenschaft kommt Florentin Wörgötter. Marc Timme und Silke Steingrube sind Physiker, die sich mit Netzwerktheorie beschäftigen. Die damals 23-jährige Studentin Steingrube war es, die bei ihrer Diplomarbeit auf die Idee kam, Amos mit einer sogenannten Chaos-Steuerung einzusetzen.

Beispiel einen sechsbeinigen Roboter anweisen: Hebe das vordere und hintere Bein der einen Seite immer zusammen mit dem mittleren Bein der anderen Seite an! Das ist eine sehr effektive Gangart, bei der immer drei Beine Bodenkontakt haben. Weil Amos fünf Gangarten beherrscht, müsste er eigentlich über fünf Programme verfügen, die je nach Umweltbedingungen abgerufen werden. Tatsächlich aber – das ist die Innovation – werden alle fünf Muster von den besagten zwei Neuronen produziert.

Neurone, lebende wie digital simulierte, sind kleine Zellen, die untereinander mit Leitungen verbunden sind, den Synapsen. Ein Neuron erzeugt aus eingehenden Signalen nach gewissen Regeln ein Ausgangssignal. Mindestens zwei Neurone und drei Synapsen braucht man, um sogenanntes Chaos zu produzieren: Trotz der simplen Verdrahtung flackern die Zustände der beiden Zellen dann auf unvorhersagbare Art und Weise.

Solches Neuronen-Chaos ist im richtigen Leben unerwünscht, es tritt zum Beispiel bei Epileptikern und Parkinson-Patienten auf. Und auch der Roboter Amos zappelt wild mit den metallenen Beinchen, wenn seine Neurone chaotisch flackern. Doch der Schaltkreis der Göttinger hat die schöne Eigenschaft, dass er sich mit einem winzigen Korrektursignal dazu zwingen lässt, periodisch zu schwingen: Es entstehen Muster, die sich alle vier, fünf oder acht Zeiteinheiten wiederholen. Und die lassen sich direkt auf die Beine des Roboters übertragen – und entsprechen jeweils einer Gangart des künstlichen Insekts.

Sie geraten aber aus dem Konzept, sobald ihre exakt definierte Umgebung sich verändert. Ihnen fehlt die Möglichkeit zur Anpassung – und die Autonomie, die ihnen eine solche Anpassung überhaupt ermöglichen würde. Das merkt inzwischen auch die Industrie. Soll etwa eine Windschutzscheibe in ein Auto eingesetzt werden, dann schafft das kein herkömmlicher Roboter mit blinder Präzision. Er kann zwar die Scheibe mit elegantem Schwung zur Karosserie bewegen – für die letzten Millimeter aber ist ein Augenmaß notwendig, das die Maschinen gerade erst zu lernen beginnen.

Apropos Lernen: Die Stärke autonomer Roboter liegt darin, dass man ihnen viel leichter beibringen kann, aus der Praxis zu lernen. Das haben die Göttinger Forscher mit ihrem Sechsheiner Amos ebenso demonstriert: Anstatt ihm für jede Umwelt-sensation die entsprechende Gangart zu diktieren, kann man auch ein Ziel vorgeben – etwa: »Verbrauche möglichst wenig Energie!« – und den Schaltkreis die verschiedenen Muster durchprobieren lassen. Wenn Amos einmal weiß, wie er am effektivsten eine schiefe Ebene hinaufklettert, macht er das beim nächsten Mal wieder so.

Aus der akademischen Robotikszene in Deutschland bekommt das Göttinger Newcomer-Team viel Anerkennung. Eine »spannende Richtung« bescheinigt Thomas Christaller vom Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme der Arbeit. Sein Institut verfolgte ähnliche Ideen, bevor es die Order bekam, sich vornehmlich um Aufträge aus der Wirtschaft zu kümmern. Helge Ritter, Neuroinformatiker von der Universität Bielefeld, ist ebenfalls begeistert. Er sieht eine Anwendung für diese simple Steuerung vor allem, sobald es gelingt, Roboter von Insektengröße zu bauen – oder gar im Nanomaßstab, die man zum Beispiel in die menschliche Blutbahn einschleusen könnte.

Viel schwieriger wird es dagegen sein, das Prinzip der chaotisch funkenden Neurone für komplexere Maschinenhirne zu nutzen. Die Modellierung auch nur eines Ameisenhirns mit seinen 10 000 Nervenzellen liegt heute noch weit jenseits der technischen Möglichkeiten. Amos ist autonom und lernfähig, aber eben auch ziemlich dumm: Trifft er auf ein Hindernis, muss er jedes Mal aufs Neue seinen Weg drum herum finden, er kann seine Handlungen nicht planen. Solche Fähigkeiten werden in den nächsten Jahrzehnten noch herkömmlich programmiert werden, etwa mit den Verfahren der klassischen Künstlichen Intelligenz (KI). Die ist in den vergangenen Jahren ein wenig in Verruf geraten, weil sie nicht alle ihre Versprechungen einlösen konnte. »Wir gehen da ganz pragmatisch vor«, sagt der Neuroinformatiker Helge Ritter, »in der KI war ja nicht alles schlecht.«

↳ Videos von Roboter Amos auf ZEIT ONLINE: www.zeit.de/roboter

Operation Vertrauen

Fortsetzung von Seite 31

tionen wirklich das Beste ist. Einig sind sich alle Experten nur, dass die Fässer in dem einsturzgefährdeten Bergwerk nicht weiter vor sich hin gammeln dürfen. Ob die jetzt propagierte Rückholung sinnvoll und überhaupt machbar ist, wird außerhalb des BfS massiv bezweifelt.

Anders als in dessen Filmen gezeigt, könnte sich herausstellen, dass sich längst nicht alle Arbeiten unter Tage fernsteuern lassen; die Fässer in den Salzkammern könnten verrottet sein, eventuell schwappen radioaktive Laugen durch den Salzstock, möglicherweise liegt auch Plutonium in der Luft. Damit würde die Rückholung nicht nur sehr viel aufwendiger als geplant; es sei damit zu rechnen, dass das Personal »mit einer substanzialen, nicht unerheblichen Strahlendosis belastet werden wird«, warnt die Entsorgungs- und Strahlenschutzkommission (ESK/SSK) des Bundesumweltministeriums.

Es könnte sein, so die Entsorgungsexperten, dass am Ende doch nur die »Verfüllung« der Asse infrage käme; mit einem speziellen Chemikaliengemisch und Betonsperren würde man dabei versuchen, die giftigen und radioaktiven Stoffe in der Tiefe gefangen zu halten und nicht an die Oberfläche gelangen zu lassen. Denn die Umlagerung in tiefere Schichten, da sind sich das BfS und die ESK einig, berge von allen drei Optionen die größte Unsicherheit.

An dem gerade vorgestellten »Optionenvergleich« des Bundesamtes für Strahlenschutz übt die ESK/SSK in einem offenen Brief deutliche Kritik. »Eine ganze Reihe von (...) zentralen Fragestellungen sind nicht bzw. nicht hinreichend behandelt«, heißt es dort. So sei völlig unklar, wie lange ein Abtransport der 126 000 Fässer wirklich dauern würde – diese Zeit spielt allerdings eine entscheidende Rolle, denn der Salzstock der Asse gilt laut Gutachten nur noch maximal zehn Jahre als stabil. Stelle sich heraus, dass die vorgelegten Kalkulationen unrealistisch seien, brachte es der ESK-Vorsitzende Michael Sailer in einem Interview auf den Punkt, könne man die Rückholung »vergessen«.

Wer anderer Meinung ist, kommt in Wolfenbüttel kaum zu Wort

Kommt in der Wolfenbüttler Lindenhalle die Rede auf solche Argumente, beginnt der Saal zu kochen. Sailer's Aussagen seien »interessengeleitet, gutachterlich fragwürdig und inhaltlich absurd«, wertet Michael Fuder vom Asse-II-Koordinationskreis, und man könnte den Eindruck bekommen, er schimpfe auf einen gekauften Büttel der Kernenergie-Lobby. Dabei gilt der Chemiker Sailer vom Öko-Institut in Darmstadt als einer der profiliertesten Atomkritiker in Deutschland. Man darf ihm abnehmen, dass er sich tatsächlich um die Asse sorgt. Doch seine Position ist hier in Wolfenbüttel nicht gefragt. Rolf Michel, der als Vorsitzender der SSK angereist ist und Sailer eigentlich auf dem Podium vertreten sollte, muss unten im Saal Platz nehmen.

Während er sich nur als Zuhörer zu Wort melden darf, sitzen auf dem Podium sechs Menschen, die sich weitgehend einig sind und den Radioökologen von oben herab belehren. Sieht so die viel gelobte Offenheit und Transparenz aus?

Man muss es sich wohl mit den Versäumnissen der Vergangenheit erklären, dass heute in Wolfenbüttel die Toleranzschwelle so niedrig liegt. Schließlich hat auch das Helmholtz-Zentrum München seinerzeit eine Schließungsvariante befürwortet, die der Option »Vollverfüllung« nahekam. Seither will dieses Wort hier niemand mehr hören. Da wird selbst jemand wie Sailer, der darauf hinweist, dass am Ende wegen gut begründeter Risikoerwägungen möglicherweise nichts anderes praktikabel sei, schnell zum Gegner abgestempelt. »Die Leute hier in der Gegend wollen jetzt nur hören: Alles wird gut«, analysiert ein junger Mann im Pu-

blikum, der wie Sailer befürchtet, dass man sich mit der Rückholung der Abfälle ein enormes neues Problem schaffe. Schließlich müsste der Müll oberhalb der Asse in einem Zwischenlager gestapelt werden, das ersten Berechnungen zufolge so groß wie 15 Fußballfelder werden könnte. »Das wird die Gegend enorm belasten, mir wäre es lieber, der Müll bliebe, wo er ist«, sagt der junge Mann leise. Doch offen zu äußern wagt er das nicht; er weiß, dass er damit in der Lindenhalle schlecht ankäme.

Wolfram König zeigt sich derweil erneut als Meister des Empörungsmangements. Auch die Experten der ESK/SSK würden »hilfreiche Arbeit« leisten, lobt er seine Gegner; sie hätten »eine Reihe von Anregungen und Anmerkungen gemacht, die teils positiv in den Ergebnisbericht des BfS eingeflossen« seien. Zwar sei man sich nicht in allem einig, letztlich aber verfolge man ja doch dasselbe Ziel. Und das Bundesamt für Strahlenschutz beabsichtige ebenfalls – wie von der ESK/SSK vorgeschlagen –, zunächst eine »repräsentative Probe« von rund 3000 Fässern zu untersuchen, bevor über das weitere Vorgehen entschieden werde – natürlich »in enger Abstimmung und im Dialog mit allen Beteiligten«.

Wo soll am Ende der Müll aus der Asse gelagert werden?

Momentan bleibt den Strahlenschützern gar nichts anderes übrig, als möglichst schnell Klarheit darüber zu gewinnen, in welchem Zustand sich die Fässer in der Asse befinden und was im Einzelnen wirklich in ihnen enthalten ist. Eine Garantie, dass man am Ende wirklich wie geplant die komplette Müllfracht ans Tageslicht bringt, das weiß König, kann auch er nicht geben – obwohl das natürlich alle von ihm erwarten. Ebenso muss er die in der Lindenhalle geäußerte Hoffnung enttäuschen, dass man die großen Energieversorgungsunternehmen zwingen könne, sich an den Kosten zu beteiligen. Denen wurde schließlich in den sechziger und siebziger Jahren explizit vom Bund garantiert, dass sie nicht für eventuelle Folgekosten der Entsorgung ihrer Abfälle haften müssen. Da sei es heute »juristisch nicht erfolgversprechend«, gegen die Unternehmen vorzugehen, sagt König; allenfalls könne man mit ihnen verhandeln.

So bleiben am Ende viele offene Fragen in der Lindenhalle, von denen die größte lautet: Wo eigentlich soll am Ende der Müll aus der Asse hin? Will man ihn nicht bis zum Sankt-Nimmerleinstag in einem Zwischenlager vor sich hin strahlen lassen, bleibt eigentlich nur eine Möglichkeit: ihn ins einzige bisher genehmigte deutsche Endlager zu bringen, in den Schacht Konrad, der ganz in der Nähe von Wolfenbüttel liegt. Nur hier, in dem stillgelegten Eisenerz-Bergwerk, glauben die Strahlenschützer derzeit die »Langzeitsicherheit« garantieren zu können, die ihnen als oberste Richtschnur ihres Handelns dient.

Doch angesichts dieser Konsequenz der Asse-Sanierung bröckelt die Begeisterung im Saal. Schließlich ergreift Landwirt Walter Traube das Wort, der mehrfach gegen die Genehmigung von Schacht Konrad geklagt hatte. Im vergangenen November wies das Bundesverfassungsgericht Traubes Klage endgültig ab, seinen Kampfeswillen konnte es jedoch nicht brechen. Er sei zwar für die Rückholung, dennoch werde er weiter gegen ein Endlager im Schacht Konrad kämpfen. »Uns ist wichtig, dass wir nicht gegeneinander ausgespielt werden«, sagt Traube unter allgemeinem Applaus. Man solle den Müll erst einmal zwischenlagern, vielleicht werde in Zukunft ja eine Möglichkeit gefunden, ihn unschädlich zu machen.

Diese Hoffnung allerdings ist momentan noch verwegener als die Erwartung, bei der Bergung der Asse-Abfälle werde alles so glattgehen wie in der Computeranimation. So viel ist nach dem Abend in der Lindenhalle klar: Der geplante Landkreis Wolfenbüttel wird noch lange nicht zur Ruhe kommen.

Ⓢ www.zeit.de/audio



126 000 FÄSSER liegen im ehemaligen Bergwerk Asse. Bei vielen ist der Inhalt unbekannt

ANZEIGE

ZEIT WISSEN SHOP

Kopernikus-Planetarium
Dieses mechanische Planetenmodell veranschaulicht den Lauf der Gestirne.

Bestellnr.: 4463
Preis: € 31,95
www.zeit.de/wissen-shop

ZEIT WISSEN

Jedes laufende Lebewesen hat mehrere »Gangarten«. Bei uns Zweibeinern sind die Varianten begrenzt, aber schon beim Pferd wächst die Zahl der Möglichkeiten, erst recht bei Sechsheinern wie etwa der Heuschrecke. Aber selbst Tausendfüßler müssen nicht bewusst steuern, welches Bein sie vor das andere setzen – die koordinierten Bewegungen folgen bestimmten Mustern, die im Gehirn von sogenannten zentralen Mustererzeugern (CPGs, von Central Pattern Generator) gesteuert werden. Will man die künstlich nachempfinden, kommen klassischerweise kleine Computerprogramme heraus, die zum