

GÜNTHER SCHLEE

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG, HALLE (SAALE)

## Wie Terroristen gemacht werden



© CT Snow from Hsinchu, Taiwan/Wikimedia Commons

Die Franzosen haben ein Sprichwort: „*Tout comprendre c'est tout pardonner*“ – ‚Alles zu verstehen, heißt alles zu verzeihen.‘ Bei aller Sympathie für unsere Nachbarn muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass dies ein ganz besonders dummer Spruch ist. Etwas zu verstehen, heißt noch lange nicht, es zu verzeihen. Das Alltagsleben fließt über von Beispielen, mit denen man dies belegen kann. Der verdeckte Ermittler muss nicht nur das Kalkül des Kriminellen rational nachvollziehen, sondern er braucht auch Empathie, d. h. er muss wie der Kriminelle fühlen können. Er muss ihn also im vollen Sinne des Wortes „verstehen“ und er liefert ihn trotzdem der Polizei aus. Ebenso tut das geschlagene Kind gut daran, die Innenwelt des gewalttätigen Vaters in den eigenen Vorstellungen zu modellieren, und daran, dessen Launen und Alkoholpegel einschätzen zu können. Das ist eine Überlebensfrage, die mit Verzeihen nichts zu tun hat. Solche Beispiele ließen sich beliebig vermehren. *Tout comprendre ce n'est pas tout pardonner.*

Dass durch gewaltförmige Konflikte unermessliches Leid ausgelöst wird, steht außer Frage. Außerdem gibt es messbare Effekte. Trotz des aus guten Gründen gewachsenen öffentlichen Interesses für klimatische Risiken und trotz der Aktualität wirtschafts- und währungspolitischer Fragen gibt es Gründe dafür, anzunehmen, dass Gewalt immer noch das größte Entwicklungshemmnis und die wichtigste Ursache für Elend in der Welt ist. Sie vernichtet menschliches Potenzial und Infrastruktur, macht erfolgte Investitionen zunichte und verhindert zukünftige, und sie führt zu sinnvollen, aber teuren Sicherheitsmaßnahmen ebenso wie zu Angstreaktionen, die sehr teuer werden können, ohne sinnvoll zu sein. Man blicke nur auf die Zahl der Toten im Straßenverkehr, die dann steigt, wenn Reisende aus Angst vor Terror-

attacken das Flugzeug meiden. Gewalt besser zu verstehen, realistischer einzuschätzen, am besten auch potenzielle Gewalteskalation zu erkennen und ihren Ausbruch zu verhindern, ist also ein lohnendes Ziel. Dass das Verstehen von Gewalttätern nichts damit zu tun hat, ihr Verhalten zu verzeihen oder gar gutzuheißen, sollte dabei klar sein.

Gewalt zu verstehen ist leichter gesagt als getan. In unserer medialen Umwelt, die die meisten von uns, einschließlich der politischen Entscheidungsträger, stärker prägt als die Wissenschaft dies tut, treten einige Effekte auf, die dem Verstehen von Gewalt entgegenwirken. Einer davon geht von den Emotionen aus, die moralische Entrüstung begleiten. Diese führen oft zur Ablehnung, sich mit einer Sache intellektuell auseinanderzusetzen. Der Ausruf „*Dafür habe ich keinerlei Verständnis!*“ drückt nicht den Wunsch nach mehr Verständlichkeit oder besserem Verstehen aus, sondern impliziert, dass man auch nicht verstehen will. Ein anderer ist die Pathologisierung. Man klassifiziert ein Phänomen als krankhaft, deviant, verrückt. Aus ärztlicher Sicht müsste dies natürlich gerade das Erkenntnisinteresse wecken, aber die wenigsten Leute teilen diese ärztliche Perspektive. Gemeint sind solche Äußerungen zumeist als Ausdruck der Ausgrenzung und des Nicht-damit-befassen-Wollens.

Als Beispiel möge der „Islamische Staat“ genügen, der zur Zeit große Teile Syriens und des Irak beherrscht und der diesen Namen wahrscheinlich zu Unrecht führt, weil er nach Ansicht vieler Muslime islamische Werte zutiefst verletzt. Dessen Feindbild ist der schamlose, promiske, gotteslästerliche, kapitalistische Westen, der den IS wiederum als barbarisch und als „Terrormiliz“ bezeichnet. In solchen Konfliktlagen entsprechen oft alle wechselseitigen Beleidigungen

hundertprozentig der Wahrheit, aber es soll nicht der Wahrheitsgehalt dieser Aussagen sein, der hier zur Rede steht. Die Frage ist vielmehr, welche Effekte diese verbalen Ausgrenzungen auf unsere kognitiven Leistungen bei der Erklärung der gewaltsamen Konflikte haben, an denen der IS beteiligt ist. Meine These ist: keine förderlichen Effekte. „Terroristen“ sind Leute, von denen man sich so weit wie möglich abgrenzt, und die Barbarei ist in Deutschland ja auch bereits seit 70 Jahren überwunden, wenn auch nur mit fremder Hilfe, und wir wollen mit ihr nichts mehr zu tun haben. Diese Haltung hilft uns nicht, herauszufinden, wie diese Gewalttäter „ticken“, d.h. ihre Gedanken und Handlungen in unseren Köpfen zu modellieren. Auch bleiben bei dieser betonten Distanz all die Tausende außer Acht, die den IS unterstützen oder zumindest als das kleinere Übel (kein Kunststück bei den gegebenen Alternativen) akzeptieren. Das müssen ja ganz normale Menschen sein. Seit Auschwitz wissen wir übrigens, dass auch die Täter in anderen Kontexten ganz normale Menschen sind. Es müsste doch eigentlich möglich sein, das Verhalten ganz normaler Menschen zu erklären. Offensichtlich fehlt es vielfach an einem ernsthaften Bemühen dazu.

Von solchen Überlegungen ausgehend, hat sich Markus V. Hoehne die Frage gestellt, was in jüngerer Zeit aus einer anderen „Terrormiliz“, Al-Shabaab, in Somalia geworden ist. Die Organisation, aus der Al-Shabaab entstanden ist, nämlich die Milizen der islamischen Gerichte in Mogadischu, war immerhin so bedeutend und wurde von ihren Gegnern als so bedrohlich wahrgenommen, dass Äthiopien mit US-amerikanischer Unterstützung 2007 einen Militärschlag gegen sie unternahm. Nur so konnte die international anerkannte (weil aus einem von der „internationalen Gemeinschaft“ organisierten „Friedensprozess“ hervorgegangene) Regierung von Somalia in der Hauptstadt Mogadischu etabliert werden. (An diesem „Friedensprozess“ war der Autor dieses Beitrags in den Jahren 2002 und 2003 als *resource person* beteiligt, allerdings nicht in einer Position, in der seine eher skeptischen Einsichten große politische Wirkung entfalten konnten.) Die islamischen Gerichtsmilizen verschwanden einfach. Sie waren nicht für den Kampf gegen reguläre, mit schweren Waffen ausgerüstete Streitkräfte geschaffen worden, waren nicht dazu in der Lage und nahmen den Kampf gar nicht erst auf. Mit ihnen verschwanden die islamischen Gerichte, die sich in der Abwesenheit eines funktionierenden Staates als Initiative von unten entwickelt hatten, und die eine breite Akzeptanz in der Bevölkerung genossen, nicht weil die Somali in für sie untypischer Weise plötzlich von religiösem Eifer und moralischer Strenge erfasst worden wären, sondern weil Geschäftsleute ein wenig Sicherheit für ihr Eigentum und ihre Transaktionen

haben wollten und dafür sehr gerne die Gerichte finanzierten – einer der seltenen Fälle in der Menschheitsgeschichte, in denen Geschäftsleute gerne Steuern zahlten. Diese Gerichte waren ein Rettungsanker in einer Gewaltökonomie, die sich allgemein durchgesetzt hatte und in der große Gewaltunternehmer, die „Warlords“, die bedeutendsten Spieler waren, das Land ausplünderten und Gemeingüter an Ausländer verscherbelteten (Fischereirechte z.B. oder die Erlaubnis zum Verkippen von Giftmüll). Der „Friedensprozess“ war ein von der „internationalen Gemeinschaft“ organisierter Kompromiss zwischen solchen Warlords. Die international anerkannte Regierung war also eine Regierung, die aus dem organisierten Verbrechen hervorgegangen war. (Nicht die erste und nicht die letzte in der Menschheitsgeschichte. Regierungen, die aus dem organisierten Verbrechen hervorgehen, sind häufiger als Geschäftsleute, die gerne Steuern zahlen.) Jetzt waren also mit dem Segen der Weltgemeinschaft wieder die Warlords an der Macht. Seitdem sind auch Truppen der Afrikanischen Union (AU) im Lande. Diese Entwicklung führte zur Radikalisierung von Teilen der Gerichtsmilizen, aus denen Al-Shabaab entstand. Diese kontrollierten bald so große Teile des Landes, dass die „legitime“, aus dem „Friedensprozess“ hervorgegangene Regierung, die gerade erst mit fremder Hilfe in der Hauptstadt etabliert worden war, sich nicht mehr weit aus der Hauptstadt herausraute. Also musste die „internationale Gemeinschaft“ wieder einschreiten. Kenianische Truppen marschierten 2011 in Somalia ein und stärkten dadurch das Bündnis zwischen Äthiopien, den Streitkräften der Afrikanischen Union, den USA und der Regierung von deren Gnaden. Al-Shabaab verlor daraufhin die Kontrolle über die Städte und war mehr und mehr auf „hit and run“-Aktionen aus der Deckung unübersichtlichen Geländes heraus beschränkt.

**SEIT AUSCHWITZ WISSEN WIR ÜBRIGENS, DASS  
AUCH DIE TÄTER IN ANDEREN KONTEXTEN GANZ  
NORMALE MENSCHEN SIND.**



Bald kam es zum Erstarren von Al-Shabaab fernab der Eingreiftruppen im Süden des Landes in einem zerklüfteten Küstengebirge ganz im Norden, am Golf von Aden. Die Entwicklung der nördlichen Landesteile, Somaliland und Puntland (beides jüngere politische Kreationen, die auf älteren Landkarten nicht zu finden sind), hat der Ethnologe Markus Hoehne seit Jahren verfolgt. Er spricht, wie es dem Standard unseres Faches entspricht, die Sprache des Landes, hat Zugang zu

den wichtigen Akteuren ebenso wie zu der Stimme des Volkes, die deren Aktionen kommentiert, nimmt sorgfältige Risikoeinschätzungen vor, organisiert seine Sicherheit selber, und ist aus Gegenden, von denen die meisten nie oder nur mit Grauen gehört haben, immer wieder heil zurückgekommen. Dadurch hat er entscheidend zur Analyse aktueller Konfliktlagen beigetragen, die alle neben globalen Bezügen die ebenso wichtigen lokalen Verästelungen aufweisen.



**WAS WIR NOCH AUS DIESER GESCHICHTE LERNEN KÖNNEN, IST, WIE TERRORISTEN GEMACHT WERDEN. ES GAB TERRORISTEN AUCH SCHON VORHER, ABER WAS WIR HIER BEOBACHTEN KÖNNEN, IST DIE AUSWEITUNG DIESER KATEGORIE.**

In diesem Küstengebirge waren Zink und Koltan gefunden worden, und insbesondere für Letzteres gibt es in den großen, schnell wachsenden asiatischen Volkswirtschaften einen unstillbaren Bedarf. Die Förderrechte waren schnell an einen australischen Konzern verkauft. Als Verkäufer war die Regierung von Puntland aufgetreten, einem halb-autonomen Gebilde im Nordosten des Landes. Der Präsident von Puntland war jedoch durch den beschriebenen „Friedensprozess“ gerade Präsident von ganz Somalia geworden und meldete jetzt Ansprüche der somalischen Bundesregierung an, deren Rechte noch nicht definiert waren, ebenso wenig wie die Rechte der Bundesstaaten, deren genaue Anzahl und Gestalt ebenfalls unklar war. Auch war diese Regierung ja zunächst nicht in der Lage, in ihre Hauptstadt einzuziehen, und traute sich dann nicht wieder so recht heraus. Trotzdem einigte man sich schnell auf die Formel Fifty-fifty. Nur eines war vergessen worden: die lokale Bevölkerung zu befragen und sie in irgendeiner Weise an dem neuen Reichtum teilhaben zu lassen. Der Klan, der dieses Küstengebirge besiedelte (Warsangeli), war kleiner als der, der im übrigen Puntland vorherrschte (Majerteen), gehörte aber zur selben weiteren Klan-Verwandtschaft (Harti). Deswegen meinte die Regierung von Puntland, sich auf die Bruderschaft aller Harti berufen zu können und nicht nach Sonderrechten der lokal vorherrschenden genealogischen Untergruppe (Warsangeli) fragen zu müssen. Genug der Klan-Namen! Was für diese Betrachtung wichtig ist, ist folgendes: Die lokale Gruppe, die hier die Ressourcen „ihres“ Landes beanspruchte, war im Vergleich zu den konkurrierenden Entwürfen von Grup-

pen und deren Gemeinsamkeit relativ klein. Sie unternahm einen beherzten bewaffneten Aufstand, geriet aber bald in Bedrängnis. So überrascht es nicht, dass ihr Hilfe von außen willkommen war.

Der lokale Sheikh hat sich zur Mobilisierung seiner Anhänger gegen die „Ungläubigen“ auf den Islam berufen. Die Linien der Bündnisse, die sich von Puntland nach Mogadischu und von dort nach Äthiopien, Kenia und in die USA ziehen lassen, legen es ja nahe, den Gegner als vom Islam abtrünnig und im Bündnis mit christlichen oder gar gottlosen Mächten darzustellen. Nach ihrer Vertreibung aus dem Süden des Landes hatten Al-Shabaab-Kämpfer hier also rhetorische und ideologische Anknüpfungspunkte. Irgendwann (Hoehne beschreibt das genauer, als wir das hier können) hat dann offenbar Al-Shabaab die Oberhand gewonnen und der lokale Sheikh geriet in Abhängigkeit von ihr.

Wenn wir den Fokus jetzt von lokalen Klänen und deren Allianzen auf das große, das globale Bild richten, sehen wir Folgendes: Die Regierung, die ohne Konsultation der lokalen Bevölkerung Förderrechte an Rohstoffen verkauft hat (ohne dem Käufer Zugang zu diesen Ressourcen sichern zu können) befand sich in einem globalen wirtschaftlichen Beziehungsnetz. Andere Knoten in diesem Netz waren ein australisches Bergbauunternehmen und Abnehmer in Asien. Gesichert werden sollten diese Beziehungen durch eine politisch-militärische Allianz unter dem Motto *War on Terror*, zu der im engeren Umfeld Äthiopien und Kenia, im weiteren die USA gehören. Durch diese übermächtige Konfiguration war die lokale Bevölkerung gezwungen, sich mit Kämpfern zu verbünden, die gleichermaßen an globale Beziehungen appellierten: an den Kampf „aller Muslime“ gegen den „dekadenten Westen“. Die Reaktion auf große Bündnisse sind große Bündnisse, oder, wo diese nicht zu förmlichen Institutionen reifen können, zumindest Appelle an weltweite Gemeinsamkeiten mit Gleichgesinnten.

Was wir noch aus dieser Geschichte lernen können, ist, wie Terroristen gemacht werden. Es gab Terroristen auch schon vorher, aber was wir hier beobachten können, ist die Ausweitung dieser Kategorie. Die Geschäftsleute von Mogadischu, die sich ein wenig Sicherheit von den islamischen Gerichten versprochen und diese als einzige zur Verfügung stehende Ordnungsmacht förderten, die Bewohner des Küstengebirges, die eigentlich nur Prozente aus dem Erlös des Bergbaus in ihrem Gebiet wollten, die einfachen Somali, die meinten, dass Verbrecherbosse vielleicht nicht die Idealbesetzung für eine Regierung sind – sie alle landeten in dieser Kategorie

und wurden zu Gegnern des „Westens“ in dessen „Krieg gegen den Terror“.

Weiter ist diese Fallgeschichte ein Beispiel dafür, wie eng Ressourcenkonflikte und Prozesse kollektiver Identifikation miteinander verwoben sind. An engere oder weitere Klanbeziehungen wurde appelliert, je nachdem, welche Akteursgruppen engere oder weitere Bevölkerungssegmente an dem Erlös aus der Förderung von Rohstoffen teilhaben lassen wollten. Auch die Kategorie „Terrorist“ durchlief in diesem Zusammenhang eine Entwicklung, nämlich eine beträchtliche Ausweitung, ebenso wie andere Selbst- und Fremdzuschreibungen. Allgemein lässt sich sagen, dass es keine „identitären Konflikte“ im Unterschied zu „Ressourcenkonflikten“ gibt. Die im englischen Sprachgebrauch häufig getroffene Unterscheidung von *identity based conflicts* und *resource based conflicts* ist unsinnig, auch wenn sich schon einige schwer nachvollziehbare Theorien an sie haften, etwa dass identitäre Konflikte unerbittlich seien und Ressourcenkonflikte im Unterschied dazu verhandelbar. Ob jemand sich mit seinen Nachbarn als Angehöriger einer weiteren Klanallianz definiert und mit ihnen Ressourcen teilt oder ob er seine Nachbarn als Abtrünnige vom Islam im Bündnis mit Christen und Gottlosen betrachtet und sich mit Islamisten aus anderen Landesteilen gegen sie verbündet, ist ein Ressourcenkonflikt, der durch Identifikationen (Selbstbeschreibungen und Feindbilder) getragen wird, oder ein Identitätskonflikt mit Implikationen für Ressourcenverteilung: wie man will. Die Frage nach der Identität ist die Frage nach den Subjekten: Wer mit wem gegen wen?, und die Frage nach den Ressourcen ist die Frage nach dem Objekt: Wer beansprucht was, worum geht es? Jede Konfliktanalyse muss beide Fragen beantworten und klären, wie die beiden Perspektiven miteinander zusammenhängen.

Die Abteilung ‚Integration und Konflikt‘ des Max-Planck-Instituts für ethnologische Forschung hat „Identifikation“ und „Allianz“ als zentrales Studienobjekt. Durch diese Begriffe sollen Handlungstheorien, die nur von Kalkülen und Motiven von Individuen ausgehen, erweitert und verbessert werden. Eine Theorie nämlich, die Entscheidungen ausschließlich daraus erklärt, welchen Nutzen oder welchen Schaden sie dem Entscheidungsträger als Individuum bringt, ist eine ärmliche Theorie. Wir alle weiten unser Selbst bei vielen Entscheidungsprozessen zu einer Referenzgruppe aus. Unter einer Referenzgruppe sei hier die Gruppe derer verstanden, auf die sich zusätzlich zum Entscheidungsträger selber dessen Kosten- und Nutzenkalküle beziehen, also die Antwort auf die Fragen: Kosten für wen?, Nutzen für wen? Zumindest beziehen wir zumeist unsere Familien in unsere Entscheidungen

ein und überlegen uns, welcher Nutzen und welche Kosten für sie aus unseren Entscheidungen resultieren. Diesen Prozess der Erweiterung des Selbst nennen wir Identifikation. Mit unterschiedlichen Gewichtungen beziehen wir auch andere Menschen als die unmittelbaren Angehörigen in dieses erweiterte Selbst ein. Man kann sich das Ganze als ein Gebilde von konzentrischen Kreisen vorstellen: engere und weitere Verwandtschaft (nach Beziehungen und Einteilungen, die von Sprachgemeinschaft zu Sprachgemeinschaft verschieden sind), engere religiöse Zugehörigkeit (dieselbe Sekte) oder weitere religiöse Zugehörigkeit (Christ, Muslim etc.), engere oder weitere sprachliche Verwandtschaft etc. Welche Kriterien hier hinzugezogen werden, ist von Fall zu Fall und Region zu Region verschieden, ebenso wie die Logik, die diese Identitäten miteinander verbindet: Ob sie sich überschneiden können, ob sie sich wechselseitig ausschließen usw. In dem hier vorgestellten Somali-Fall z. B. spielten engere und weitere Klanzugehörigkeiten eine Rolle sowie eine religiöse Identifikation, die Klanggrenzen zu überwinden trachtete. Wir hätten auch noch näher auf staatliche Einteilungen und Staatsentwürfe eingehen können. Wechselnde Identifikationen mit Somalia, Puntland, Somaliland und der Transfer von Loyalitäten spielten hier auch eine Rolle.

**ECHTER ALTRUISMUS, ALSO HILFE GEGENÜBER ANDEREN TROTZ ODER GERADE WEGEN IHRES ANDERSEINS, IST VERGLEICHSWEISE SELTEN.**



Nicht durch Ausweitung des Selbst, sondern ausdrücklich durch die Betonung von Unterschieden, wirkt eine andere Bindungsform, nämlich die Allianz oder das Bündnis. Allianzen bestehen immer zwischen verschiedenen Gruppen, Institutionen oder Individuen und dienen der Erreichung eines umschriebenen Katalogs gemeinsamer Ziele. Politische Koalitionen und militärische Bündnisse sind Beispiele für Allianzen. Man kann seinen Alliierten aus zwei Gründen zuarbeiten: Um sie bei der Erreichung gemeinsamer Ziele zu unterstützen oder mit Blick auf mögliche spätere Gegenleistungen. In beiden Fällen handelt es sich sozusagen um unechten Altruismus, weil man dem anderen hilft, aber der letzte Nutzen doch einem selbst oder denen, mit denen man sich identifiziert, zufließen soll. Auch Hilfe gegenüber denen, mit denen man sich identifiziert, ist in gewisser Weise unechter

Altruismus, weil diese Hilfe ihnen ja aufgrund ihrer Ähnlichkeit zum Akteur und nicht aufgrund ihres Andersseins (ihrer Alterität) zukommt. Echter Altruismus, d.h. Hilfe gegenüber anderen trotz oder gerade wegen ihres Andersseins und ohne die Erwartungen von Gegenleistungen oder Anerkennung durch Dritte, ist vergleichsweise selten und spielt bei der Analyse sozialer und politischer Zusammenhänge eine geringere Rolle als die zwei skizzierten Formen von unechtem Altruismus.

Selbst und durch vielfältige Kooperationen hat das Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung außer Ost- und Nordostafrika die hier skizzierten Zusammenhänge in anderen Teilen Afrikas, insbesondere in den Ländern der Oberen Guinea-Küste, untersucht, die in den neunziger Jahren für ihre miteinander verwobenen Bürgerkriege notorisch waren und im Jahr 2014 durch den Ebola-Ausbruch in das Interesse der Öffentlichkeit gerückt sind. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist Zentralasien, bisher speziell die postsozialistischen Staaten dieser Region, aber auch Afghanistan. Der hier beschriebene Erklärungsansatz hat sich in all diesen Fällen als leistungsfähig erwiesen. Seine Weiterentwicklung und Anwendung auf andere Teile der Welt ist daher vielversprechend.

## How terrorists are made

The French have a proverb: “Tout comprendre c’est tout pardonner” – “To understand everything is to forgive everything.” While we hold our neighbours in the highest possible regard, it must be noted at this point that this is a particularly silly saying. Understanding something and forgiving it are two entirely different kettles of fish. Everyday life is replete with examples that confirm this. An undercover agent not only has to rationally comprehend the calculating mind of a criminal but also needs empathy, i.e. he must be able to put himself in the criminal’s shoes. In other words, he has to “understand” him in the fullest sense of the word, and yet he still hands him over to the police. Likewise, a battered child would do well to model the inner world of her violent father in her mind in order to gauge his moods and alcohol level. This is a question of survival that has nothing to do with forgiveness. The list of examples can be continued infinitely. To understand is not to forgive.

That violent conflicts cause immeasurable suffering is indisputable. There are also measurable effects. Notwithstanding well-founded public interest in climate-related risks and notwithstanding the urgency of economic and currency issues, there are reasons to assume that violence is still the greatest obstacle to development and the most significant cause of suffering in the world. It destroys human potential and infrastructure, wipes out investments and leads to sensible but expensive security measures as well as fear-induced reactions that can be very expensive without being sensible. Consider, for example, the number of road deaths, which increases when people avoid travelling by plane for fear of terrorist attacks. So an ability to understand violence better, assess it realistically and, if possible, recognise a potential escalation and prevent an outbreak of violence is a worthwhile goal. Nevertheless, it is clear that understanding perpetrators of violence has nothing to do with forgiving, let alone condoning, their behaviour.

Understanding violence is easier said than done. In our media-saturated environment, which shapes most of us, including political decision-makers, more strongly than science, effects come to the fore that hinder an understanding of violence. One of them stems from the emotions associated with moral outrage. These often lead to a refusal to deal with a matter intellectually. The statement “I just can’t understand it!” does not express a desire for better comprehension or understanding but implies that the speaker does not want to understand. Another effect is pathologisation. We classify a phenomenon as pathological, deviant, crazy. From a medical point of view, of course, this should pique our interest to understand it. But few people share this medical perspective. In most cases,

such statements are an expression of exclusion and a desire to distance oneself.

Take, for example, the “Islamic State”, which currently controls large sections of Syria and Iraq and which has probably unjustifiably arrogated this name to itself, because in the opinion of many Muslims the organisation is profoundly at odds with Islamic values. Its stereotype of the enemy is that of the shameless, promiscuous, profane capitalistic West, which in turn brands the Islamic State as barbaric and a “terroristic militia”. In conflict situations, such mutual insults often reflect the truth one hundred percent, but here we are not concerned with the inherent truth of these statements. The question, rather, is what effects these verbal exclusory statements have on our cognitive ability to explain violent conflicts in which the Islamic State is involved. My assertion is: no conducive effect whatsoever. “Terrorists” are people you want to distance yourself from as much as possible: barbarity was vanquished in Germany 70 years ago, albeit with foreign help, and we want nothing more to do with it. This attitude does not help us to find out what makes the perpetrators of violence tick, i.e. to model their thoughts and actions in our minds. This strong desire to distance ourselves also ignores the thousands of people who support the Islamic State or at least accept it as the lesser evil (no surprise, considering the available alternatives). Incidentally, ever since Auschwitz we have known that perpetrators of violence are entirely normal people in other contexts. So it should in fact be possible to explain the behaviour of entirely normal people. Obviously, in many cases there is no serious desire to do so.

**UNDERSTANDING VIOLENCE IS EASIER SAID THAN DONE. IN OUR MEDIA-SATURATED ENVIRONMENT, EFFECTS COME TO THE FORE THAT HINDER AN UNDERSTANDING OF VIOLENCE.**



Based on such considerations, Markus V. Hoehne raised the question of what has become of another “terrorist militia”, Al-Shabaab, in Somalia in recent times. The organisation that has emerged from Al-Shabaab, namely the militias of the Islamic Courts in Mogadishu, was so important and was perceived by its opponents as so threatening, that Ethiopia launched a military campaign against it in 2007 with US support. Only in this way could the internationally recognized government of

Somalia be established in the capital of Mogadishu (internationally recognized because it was formed by a “peace process” coordinated by the “international community”). (Incidentally, the author of this paper was involved in this “peace process” as a resource person in 2002 and 2003 but not in a position in which his rather sceptical views could have major political impact.) The Islamic Court Militias simply disappeared. They were not created to fight against regular military units equipped with heavy weapons and were not in a position to fight, so they did not engage the enemy. With them, the Islamic Courts vanished. In the absence of a functional state, the Islamic Courts had developed as a grass-root initiative and enjoyed widespread acceptance within the population – not because Somalia was suddenly gripped by an atypical religious zeal and moral rigour but because business people wanted a little security for their property and their transactions and were happy to fund the courts – one of the very rare cases in the history of mankind where business people were happy to pay taxes. The Islamic Courts were a lifeline in the violence-riven economy that had generally prevailed and in which the key players were major warlords who plundered the country and flogged off communally owned assets to foreigners (fishing rights, for example, and permission to dump toxic waste). The “peace process” was a compromise between the warlords brokered by the “international community”. The internationally recognized government was therefore a government that emerged from organised crime. (Not the first and not the last in human history. Governments that emerge from organised crime are more common than business people who happily pay their taxes.) Now the warlords were in power again with the blessing of the international community. Since then, troops of the African Union (AU) have also been in the country. This development led to radicalisation of some of the Court Militias from which Al-Shabaab arose. Soon they controlled such large swaths of the country that the “legitimate” government formed through the “peace process”, which had been established in the capital with foreign help, no longer dared venture far from the capital. So the “international community” had to step in again. Kenyan troops marched into Somalia in 2011, thus strengthening the alliance between Ethiopia, the forces of the African Union, the USA and the

government they supported. Al-Shabaab then lost control of the cities and was increasingly constrained to conduct hit-and-run operations from the cover of the rugged terrain.

Soon Al-Shabaab regained strength in the north of the country in a craggy mountainous area on the coast bordering the Gulf of Aden far from the battle troops in the south. Markus Hoehne has been following the development of the northern state-like formations, Somaliland and Puntland (both recent political creations that do not appear on older maps) for some years. In keeping with the standard of our discipline, he speaks the language of the country, has access to the important players and to the voice of the people who comment on their actions, undertakes careful risk assessments, organises his security himself and has repeatedly returned safely from regions that most people have never heard of or whose names conjure up feelings of dread. He has made a key contribution to the analysis of current conflict situations, all of which have not only global implications but also significant local ramifications.

Zinc and coltan were discovered in this coastal area. There is a strong, rapidly growing and insatiable demand in Asian economies particularly for coltan. The mining rights were quickly sold to an Australian company. The seller was the government of Puntland, a semi-autonomous entity in the northeast of the country. However, the “peace process” had just catapulted the president of Puntland to the president of the whole of Somalia. He then set out claims on behalf of the Somalian federal government, whose rights had not yet been defined. Nor, for that matter, had the rights of the states, whose exact number and form were also unclear, been defined. Moreover, initially this government found itself unable to move into the capital, and when it did, it hardly dared to venture out again. Nevertheless, the parties soon settled on a fifty-fifty formula. But they had forgotten just one thing: to ask the local population and allow them to share in the new-found wealth in some way. The clan that settled these coastal mountains (the Warsangeli) was smaller than the clan that prevailed in the rest of Puntland (the Majerteen) but is part of the same confederation of clans (the Harti). Moreover, the government of Puntland believed it could rely on the brotherhood of all Harti without having to consider the specific rights of the locally ruling genealogical subclan (the Warsangeli). Enough of the clan names! What’s important in the present context is this: The local group that claimed the resources of “its” land was relatively small in comparison to the competing aggregations of groups and their overarching affiliations. It launched a spirited armed uprising but soon ran into trouble. It is therefore not surprising that they welcomed help from outside.



**INCIDENTALLY, EVER SINCE AUSCHWITZ WE HAVE KNOWN THAT PERPETRATORS OF VIOLENCE ARE ENTIRELY NORMAL PEOPLE IN OTHER CONTEXTS.**

The local sheikh appealed to Islamic sentiments to mobilise his followers against the infidels. The lines of the alliance that stretched from Puntland to Mogadishu and from there to Ethiopia, Kenya and the USA made it expedient to portray the opponents as Islamic apostates in collusion with Christian or even godless powers. After being driven out of the south of the country, Al-Shabaab fighters found rhetorical and ideological points of contact here. At some point (Hoehne describes it in more detail than we can here), Al-Shabaab then evidently gained the upper hand, and the local sheikh became subservient to it.

Shifting our focus from the local clans and their alliances to the larger, global picture, we see the following: The government, which had sold off the mining rights to raw materials (without being able to guarantee access to those resources by the buyers) without consulting the local population, found itself in a global economic web. Other nodes in this web were an Australian mining company and customers in Asia. These relationships were supposed to be cemented by a political military alliance under the motto of *War on Terror*, which included Ethiopia and Kenya in the immediate area and the USA further afield. Faced with this overwhelming configuration, the local population was forced to form alliances with fighters who likewise appealed to global causes: the struggle of “all Muslims” against the “decadent West”. The reaction to large alliances are large alliances or, if they cannot mature into formal institutions, at least appeals to beliefs globally shared with kindred spirits.

Another thing we can learn from this story is how terrorists are made. There were terrorists before, but what we observe here is an expansion of this category. The business people of Mogadishu, who expected a little security from the Islamic Courts and supported them as the only available peacekeeping power, the inhabitants of the coastal region, who actually only wanted a share of the revenues from mining in their homeland, the simple Somalis, who felt that warlords are perhaps not the ideal officeholders in a government – they were all bundled into this category and branded opponents of the “West” in its “War on Terror”.

This case history also illustrates how tightly resource-based conflicts and processes of collective identity are intertwined. Appeals were made to narrow and broad clan relationships, depending on which group of players wanted narrow or broad population segments to share in the profit from the mining of raw materials. The category of “terrorist” also evolved in this context, becoming significantly broader, as did other

**WHAT WE CAN STILL LEARN FROM THIS STORY  
IS HOW TERRORISTS ARE MADE. THERE WERE  
TERRORISTS BEFORE, BUT WHAT WE OBSERVE  
HERE IS AN EXPANSION OF THIS CATEGORY.**



attributions of self and others. In general, it can be said that there are no identity-based conflicts versus resource-based conflicts. This distinction, often encountered in English usage, is nonsense, even if some abstruse theories adhere to it, arguing, for example, that identity-based conflict can be implacable, while resource-based conflicts are negotiable. Whether a person sees his neighbours as members of a broad clan alliance and shares resources with them or whether that person sees his neighbours as apostates of Islam in collusion with Christians and atheists and forms alliances against them with Islamists from other parts of the country, it is a resource-based conflict waged through identities (self-descriptions and images of the enemy) or an identity-based conflict with implications for resource distribution, as you will. The question of identity is a question of subjects: who with whom against whom?, while the question of resources is a question of objects: who claims what; what’s it about? Every conflict analysis must answer both questions and clarify how the two perspectives are related.

“Identity” and “alliance” are key study objects of the Integration and Conflict Department of the Max Planck Institute for Social Anthropology. These concepts are meant to expand and improve theories of actions that result only from the calculations and motives of individuals. Any theory that seeks to explain decisions solely in terms of the benefits or disadvantages they have for the decision-maker as an individual is an impoverished one. The reference group in this context is understood to be the group to whom the cost and benefit calculations relate apart from the decision-makers themselves, i.e. the answer to the questions: costs for whom?, benefits for whom? We usually consider at least our families in our decisions and reflect on what benefits and costs will accrue to them as a result. We call this process of expanding the self *identification*. To a greater or lesser extent, we also include other people as immediate members of our expanded self. You can visualise the whole thing as a group of concentric circles: distant or close kinship (according to relationships and classifications that differ from one linguistic community to another), close (the same sect) or distant religious affinity

(Christian, Muslim, etc.), close or distant linguistic propinquity, etc. Other criteria considered in decision-making vary from case to case and region to region, as does the logic that links these identities: whether they can overlap, whether they are mutually exclusive, etc. In the Somali case discussed here, for example, close and distant clan affiliations play a role, as does religious identity, which seeks to transcend clan boundaries. We would have also liked to investigate statelike entities and state projects in more detail. Shifting identities within Somalia, Puntland and Somaliland and the transfer of loyalties also play a role here.



**TRUE ALTRUISM, I.E. HELPING OTHERS DESPITE OR BECAUSE OF THEIR OTHERNESS, IS RELATIVELY RARE.**

Another binding force acts not by expanding the self but expressly by emphasising differences, namely the alliance or federation. Alliances are always formed between different groups, institutions or individuals and serve to achieve a defined catalogue of shared goals. Examples are political coalitions and military alliances. You can assist your allies for two reasons: to support them in achieving shared goals, or with a view to receiving possible later services in return. Both cases are forms of pseudo-altruism, because one party helps the other, but the ultimate benefit is meant to accrue to a self or those with whom one identifies. Even helping those with whom one identifies is, in a manner speaking, a form of pseudo-altruism, because help is granted on the basis one's similarity to the actor and not their otherness (alterity). True altruism, i.e. helping others despite or because of their otherness and without expectation of services in return or recognition by third parties, is relatively rare and plays a more subsidiary role in the analysis of social and political relationships than the two forms of pseudo-altruism described above.

By itself and through many collaborations, the Max Planck Institute for Social Anthropology has analysed the relationships outlined here in other parts of Africa other than in East and North Africa, especially in the countries of the upper Guinea coast, which were notorious in the 1990s for their interlinked civil wars and which captured the public's attention in 2014 as a result of the Ebola outbreak. Another key research area is Central Asia, specifically the postsocialist states in this region as well as Afghanistan. The approach described here has proved robust in all these cases. Its further refinement and application to other parts of the globe are therefore promising.

# 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 Robotiksysteme 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.

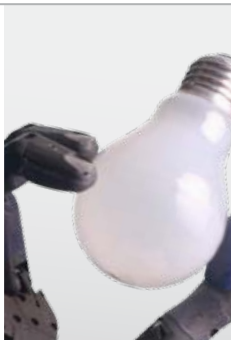
Der derzeitige Stand der Forschung ist, dass komplexes Verhalten wie Manipulationsaufgaben, Fortbewegung auf Beinen oder Ganzkörpermanipulationen noch viel manuelle Programmierung benötigt. Damit beispielsweise der Roboter eine Tasse aus dem Küchenschrank holt, unterteilen die Wissenschaftler die Gesamtaufgabe 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.

STEFAN SCHAAL

MAX PLANCK INSTITUTE FOR INTELLIGENT SYSTEMS, TÜBINGEN

## Robots are becoming autonomous

Towards the end of the 1990s Japan launched a globally unique wave of funding of humanoid robots. The motivation was clearly formulated: demographic trends with rising life expectancy and stagnating or declining population sizes in highly developed countries will create problems in the foreseeable future, in particular with regard to the care of the elderly due to a relatively sharp fall in the number of younger people able to help the elderly cope with everyday activities. Autonomous robots are a possible solution, and automotive companies like Honda and Toyota have invested billions in a potential new industrial sector.

Today, some 15 years down the line, the challenge of “ageing societies” has not changed, and Europe and the US have also identified and singled out this very problem. But new challenges have also emerged. Earthquakes and floods cause unimaginable damage in densely populated areas. And ongoing global climate change could increasingly trigger further natural disasters. Another constant threat, that of rapidly spreading epidemics, has recently been highlighted by the Ebola crisis.

One hope for the future is that someday we will have autonomous technological helpers, i.e. autonomous robots that can provide assistance in all these areas. Of course, visions of such autonomous systems go well beyond the relatively obvious concepts of humanoid robots. They cover a broad range of scales – from nanorobots to large industrial robots. Toy robots, robots that can provide emotional support and miniature robots able to carry out clinical tasks directly inside the body are just some conceivable examples.

However, the current state of science and technology is far behind such societal aspirations. In the wake of the Fukushima reactor catastrophe, no robot was deployed that could provide useful help – despite the rapid development of mechatronics, which has spawned thousands of robot prototypes, especially in Japan. During the ongoing Ebola epidemic, people continue to be exposed to the contagious viruses during cleaning and clearance work. These are tasks that really could be performed autonomously without human intervention. And nanorobotics for clinical purposes is still firmly in the realm of basic research.

The first simple autonomous robots are being used today in private households (vacuum cleaners, lawnmowers), for military reconnaissance in rugged terrain, in driverless cars and in drones. These are essentially mobile wheeled or airborne robots without arms or grippers to perform manipulations. Robots that are able to run on legs across uneven ground

or carry out complex manipulations are still in the research stage. Research into humanoid robots and assistive robots is being pursued around the world. Problems such as the complexity of perception, effective control without endangering the environment and a lack of learning aptitude and adaptability continue to confront researchers with daunting challenges for the future. Thus, an understanding of autonomous systems remains essentially a topic of basic research.

### AUTONOMOUS ROBOTICS: PERCEPTION-ACTION-LEARNING

Autonomous systems can be generally characterised as perception-action-learning systems. Such systems should be able to perform useful tasks for extended periods autonomously, meaning without external assistance. In robotics, systems have to perform physical tasks and thus have to be realized physically. Sensors allow the system to perceive the environment and its own body. Learning and adaptation mechanisms enable it to adapt to changing environments or learn entirely new behaviours. The system must be able to respond to changing situations and disturbances robustly and without accidents.

It is difficult to assign autonomous robots to a specific discipline, such as artificial intelligence (AI), mechatronics research or machine learning (ML). Autonomous robotics requires a large number of components that must all be coordinated to collectively produce a robust behaviour, e.g. perception, control, planning and learning processes. This also raises a challenge regarding the reliability of such systems: for example, if ten components are concatenated, each of which has 99% robustness, the probability that the overall behaviour of the system will be reliable is only 90%.

Such a system would not be viable in daily use. However, given the current state of research, 100% reliability of the individual components is essentially only possible with analytical methods, i.e. methods that can be derived from accurate mathematical modelling. Empirical methods, namely data-driven methods that are derived from machine learning, barely achieve this level of reliability. This presents a daunting problem: complicated robotics systems have no reliable modelling, and empirical methods are not yet sufficiently accurate to bypass analytical models. A current focus of research is therefore to determine which system components can be realised with machine learning, as well as to find new analytical methods that are more robust than inaccurate models. As it is often very time-consuming for robots to learn new behaviours, discussions are also focussing on how a global database and central computing centres for robotics can be

established by means of cloud computing. This appears particularly promising for perception tasks, but not so much for direct robotic control signals, which are very system-specific and require real-time processing.

In conclusion it can be said that autonomous robotics require a very broad knowledge base beyond the usual and narrowly defined standards of the contributing core disciplines. What is required is not so much specialists from one field but individuals who are multidisciplinary in their approach and are able to build bridges. In other words, scientists are called for who are simultaneously experts in mechanics, physics, electrical engineering, computer vision, control technology, ML, AI and software engineering. An interest in cognitive sciences would also be helpful when the aim is to mimic biological systems. To date, there are few researchers in the world who fit this profile and few educational options that convey such a broad knowledge.

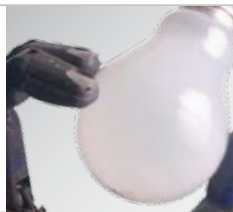
#### AN OUTLINE OF THE CURRENT STATE OF RESEARCH

*Mobile systems:* When it comes to achieving high levels of autonomy, mobile robotic applications are certainly the most advanced. Mobile robots – with few exceptions all of them mounted on wheels, not on legs – are standard research topics in many computer science labs. This topic was particularly popular in research in the 1990s and experienced a breakthrough around 2005 thanks to the DARPA Grand Challenge, a competition in autonomous vehicle navigation. The fact that six teams reached the finish line in the Grand Challenge with rather minor time differences shows that research and technology in this field is quite advanced. The focus was more on good system integration, software engineering and quality control rather than on algorithms; most of the components for autonomous navigation were already well known at the time. It is therefore surmised that autonomous navigation on wheels has gradually left the research labs and has now been taken up by industry through technology transfer.

*Assistive robots and humanoid robots:* The situation is quite different with regard to autonomous manipulation robots, i.e. robots with arms, hands and legs, which include humanoid robots. Navigation in two-dimensional space with vehicles is a low-dimensional problem and is highly structured by the environment (roads, corridors, traffic signs, walls, etc.). The aim of navigation is therefore defined in rather simple specifications, namely to reach a destination while avoiding accidents. Such scenarios can be effectively handled today by machine learning and artificial intelligence methods. By contrast, manipulation robots are high-dimensional systems, often with more than 50 control dimensions, and non-intuitive geometric

spaces for planning and control. For example, a humanoid robot often has seven degrees of freedom per arm and leg plus 10–20 additional degrees of freedom for the body, fingers and head. Many machine learning and artificial intelligence methods were developed for low-dimensional spaces and do not scale up well to high-dimensional spaces, i.e. the calculations required to plan and optimise in these spaces grows exponentially with the number of spatial dimensions. In many cases it is not even possible to collect enough data in a sufficiently short time to be able to process them empirically in these spaces: the process of data collection in real-time is simply too slow to even approximate high-dimensional spaces, even after 100 years of uninterrupted operation of a robot. Hence, a mixture of analytical and empirical methods is currently the most efficient way to achieve competent behaviour. If good mathematical models exist, it is often possible to work more efficiently with those models than with models that first have to be learned empirically through data acquisition.

**FREQUENTLY, IT IS NOT CLEAR HOW THE GOAL OF A BEHAVIOUR CAN BE MATHEMATICALLY FORMULATED. FOR EXAMPLE, WHAT DOES “STIRRING SOUP WITH A SPOON” MEAN IN MATHEMATICAL TERMS?**



The current state of research is that complex behaviour such as manipulation tasks, locomotion on legs and whole-body manipulations still requires a great deal of manual programming. For a robot to fetch a cup from a kitchen cabinet, for instance, scientists divide the overall task into individual subtasks (e.g. “go into the kitchen,” “find the cabinet,” “open the cabinet door,” “grasp the cup,” etc.) and define the sequence in which those actions must be performed. The robot’s behaviour in the individual subtasks is then achieved by means of programming and/or learning methods. In many cases, robustness problems occur in perception, in the control of the robot and in the algorithms used, and additional behaviours are required to correct for errors. Frequently, it is not clear how the goal of a behaviour can be mathematically formulated. For example, what does “stirring soup with a spoon” mean in mathematical terms? Quickly, overly specific solutions for a behavioural task arise that are neither robust nor transferrable to other tasks or other robots. Small changes in the environment or calibration of the robot can quickly lead to completely incorrect behaviour.

Truly autonomous behaviour of manipulation robots is therefore still very far from reality. Certain autonomous subsets of

behaviours can be achieved, for example balancing and walking on two legs on level ground or movements for grasping relatively arbitrary objects. The term “supervised autonomy” is often used today. This means that a short movement is performed autonomously, after which a human determines the next goal and the appropriate behaviour. The hope of constructing autonomous robotic assistants in society, a vision described earlier, is therefore still a long way from realisation.



**THANKS TO THE ALMOST COUNTLESS IMAGES  
ON THE INTERNET, AN INEXHAUSTIBLE RESERVOIR  
OF LEARNING DATA IS NOW AVAILABLE.**

*Micro- and nano robotics:* Reducing the linear scale of robots to centimetres, millimetres, micrometres and even nanometres produces a whole new set of challenges. Different physical laws apply at these scales than at the scale of mammals. Whereas the mechanics of a human-like system is largely characterised by inertial forces, at the centimetre and millimetre scales frictional forces and surface tension play a much greater role. That is why, for example, some insects, unlike humans, are able to walk on water. At the micrometre scale, this means that an intelligent swimming technique in liquids with a corkscrew-like motion is much more efficient than, say, the fin-driven motion of fish. Moving down even further on the length scale, stochastic influences dominate, such that behavioural goals can only be achieved in swarms of many systems – and then only to a certain degree of probability.

Sensors and motors are also different at small scales. Sensors are often realised by way of chemical processes. Motor function and energy supply become complex problems, so that an external source is often needed in research, for example magnetic fields or an atomic force microscope. Batteries are utterly inefficient at the micro and nano scales. And it remains unclear what data-processing methods are even possible at such scales. Autonomous robotic systems at the micro and nano range are still firmly in the domain of basic research. Autonomous perception

Recognising and understanding the world and deriving behavioural possibilities are important aspects of perception. Computer vision (the simulation of vision by computers) has made great strides in recent years – on the one hand, as low-cost camera systems are now available, so that anyone who wants

to work with cameras can easily do so; and on the other, because computers have become so fast that even complex image processing can be performed on a laptop.

Scene categorisation and object and face recognition are very far advanced. Thanks to the almost countless images on the Internet, an inexhaustible reservoir of learning data is now available. If this can be combined with large computer networks, it would be possible to train learning systems to a high level of quality. This is currently being intensively studied with deep learning, a new approach to machine learning that uses multi-layered neuronal networks and improved learning methods which profit from large computing clusters. “Action recognition” is another topic that is also attracting much attention. Specifically, it consists of recognising human motions and then understanding the intention behind those motions. It is relatively easy to recognise locomotion on two legs; however, recognising whether a person is playing soccer or just jogging is a much more complicated task. What researchers hope to achieve is an understanding of every kind of action – for example, grasping a cup, eating with a fork or playing with building blocks. This skill is essential if autonomous robots are to interact with humans in a human environment.

Of course there are also other perception sensors: tactile sensors, force sensors, microphones, etc. can provide valuable data to complement other sensory modes. Human perception is probably so successful because it is multi-modal, such that we rarely have to rely on just one modality. This fusion of sensors is an area of research, but is unfortunately not very pronounced in current projects.

In any case, a major problem remains: making the information processing robust enough so that variables – a change in lighting, the noise of a construction site, the tactile difference between a plastic cup and a porcelain one, or the like – do not overwhelm the perception system. Robust autonomous perception is therefore certainly one of the most daunting problems facing autonomous robotics.

*Learning systems, planning systems and artificial intelligence:* There are now a large number of algorithms to facilitate planning and learning tasks. Only experienced experts are able to judge which algorithm is applicable, what its weaknesses and strengths are and how efficiently it can be used. Of course, the hope of science is to produce generic black-box systems, i.e. systems that function with 100% reliability without the normal user having to understand what takes place inside the system. That has not yet been realised and perhaps never

will be, as universal learning systems (systems that can learn any task) are theoretically impossible. Nevertheless, the hope remains that the creation of such black-box systems might be possible, at least in certain restricted domains. This would require specialists who are very well versed in AI, ML, robotics and perception. Unfortunately, specialists with such broad knowledge are rare. Universities continue to focus on educational specialisations, such as control theory, computer vision and machine learning. Few faculties and institutes stress a broad education in “perception-action-learning” systems.

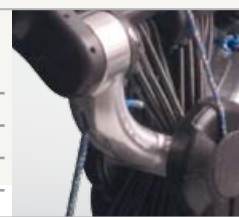
*Hardware developments:* Hardware realisation is a prerequisite for autonomous robots. Working with the right robots and right sensors in real and complex environments poses problems that cannot be reasonably simulated. Of course, the quality of the hardware plays an important role. Hardware problems often make it necessary to improve algorithms or adopt completely different strategies of autonomous robotics. For example, the position sensors of some robots are not accurate enough to determine where exactly the hand is in 3D space. Computer vision algorithms that locate the hand with the help of 3D camera images are then needed to help out. Future developments in mechatronics are required to produce reliable high-quality, high-performance robots.

For robots on the nanometre to millimetre scale, the fabrication technology often represents the dominant research topic. Using material research methods, it is possible to develop techniques that generate thousands of robots at once. However, it is up to basic research to determine exactly what functions can be integrated into these miniscule robots. Investments often centre on the nano process technology that underlies such fabrication methods and has to run through many iterations until suitable systems can be synthesised.

*Software developments:* Appropriate hardware is clearly a prerequisite for autonomous robots; however, autonomy resides primarily in the software systems. And precisely those software systems are one of the core problems in autonomous robotics, as there are few standardised software systems. It is relatively easy to program a robotic function “somehow” in a feasibility study, such that a successful behaviour is produced at least once. This is what research labs and universities mostly achieve. But a robust autonomous system with reproducible behaviour, with perception, action and learning components and with complex algorithms quickly becomes too large to be realised and maintained by “software amateurs”. True software engineering requires suitable personnel, i.e. researchers familiar both with software engineering and

the problems of autonomous robotics. Software errors can have catastrophic consequences in robotics, for which reason entirely different and more conservative programming methods are called for. Unfortunately, there are few experts who combine all this knowledge.

**TRUE SOFTWARE ENGINEERING REQUIRES SUITABLE PERSONNEL, I.E. RESEARCHERS FAMILIAR BOTH WITH SOFTWARE ENGINEERING AND THE PROBLEMS OF AUTONOMOUS ROBOTICS.**



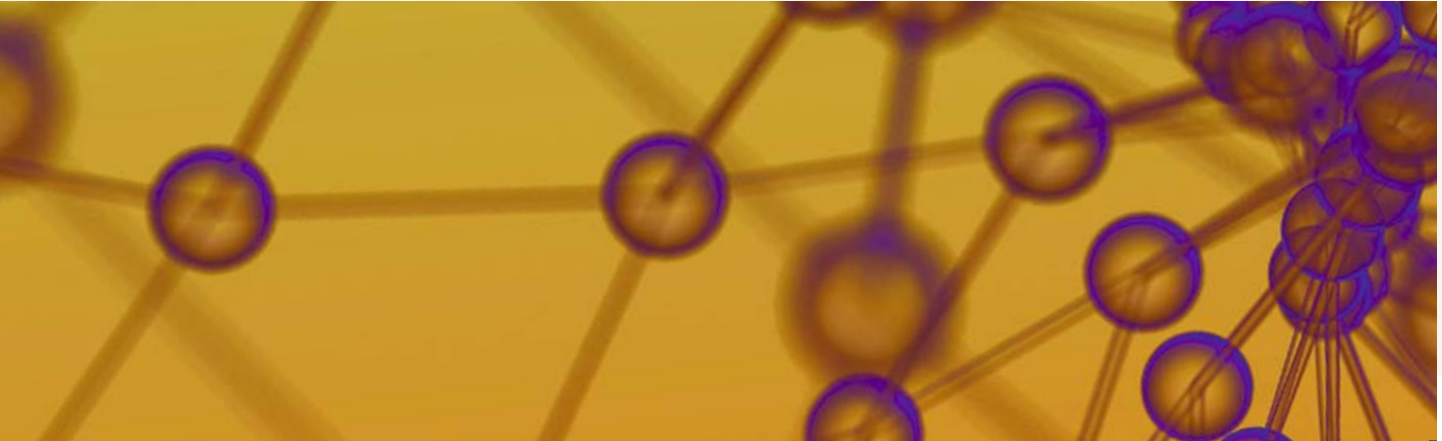
*“Perception-action-learning” systems:* Following these explanations about the state of research and technology in the field of autonomous robotics, it is also important to again highlight the foundations of these systems, i.e. integrated perception-action-learning systems. All three components of these systems are linked in a closed loop. Consequently, such systems cannot simply be divided into independent modules, as the quality of one module can easily affect the function of another. The hardware of a robot also being part of this loop, the software has to be adapted to the hardware. It is therefore no surprise that every robotics project quickly becomes unique, with the perception, control and learning algorithms generating very specific solutions that cannot be transferred to other robot systems. Therefore, one of the major goals of research and technology is to understand what building blocks and complex learning algorithms can generally be used to build autonomous perception-action-learning systems, so that the hardware, the environment and submodules autonomously adapt, analogous to the way in which biological systems deal with a constantly growing and ageing body.

#### **SUMMARY**

Experts in all technically advanced countries agree that robots, particularly autonomous robots, will become part of everyday life in human societies in the foreseeable future. However, a great deal of R&D work is still required to devise such systems. In all research areas of autonomous robotics, namely perception, control, adaptability, learning capability and mechatronics, there are significant unknown quantities that still do not permit robust autonomous robots to be created for everyday use. It remains a challenge for basic and applied research to develop general building blocks for autonomous robots. Scientific councils and political decision makers also faces a challenge in providing suitable support for such highly interdisciplinary and complex research in this field.

VICTOR SOURJIK  
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR TERRESTRICHE MIKROBIOLOGIE, MARBURG

## Regeln für die Zusammenarbeit in der Zelle



Proteine agieren in der Zelle niemals allein. Selbst die einfachsten Zellfunktionen, etwa der Transport eines Moleküls durch die Zellmembran oder die Identifikation einer künftigen Zellteilungsstelle, werden normalerweise von Gruppen interagierender Proteine ausgeführt. Diese Gruppen können am besten als Proteinnetzwerke dargestellt werden, wobei die Netzknoten einzelne Proteine und die Verbindungen zwischen den Knoten deren Interaktionen repräsentieren. Je komplexer die Aufgabe ist, umso größer und komplexer ist das zugrunde liegende Netzwerk. Letztlich können sogar alle funktionalen Netze zu einem zellenweiten Netzwerk verbunden werden. Die nächsten großen Herausforderungen in der Biologie bestehen darin, die Regeln zu verstehen, nach denen diese Netzwerke im Kontext einer lebenden Zelle funktionieren, und diese Regeln für ein rationales Design der Netzwerkfunktionen zu nutzen.

### VON DER MOLEKULARBIOLOGIE ZUR SYSTEMBIOLOGIE

Eine netzwerkorientierte Sicht auf die Zellbiologie hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Akzeptanz gewonnen. Dennoch stellt diese Perspektive eine drastische Paradigmenverschiebung dar, die es noch anzuerkennen gilt. Seit es die Molekularbiologie und die Biochemie gibt, haben sich diese Forschungsbereiche in erster Linie auf die Analyse einzelner Gene oder Proteine konzentriert und dabei einen Ansatz verfolgt, der auf die Zerlegung zellulärer Prozesse in Elementarfunktionen abzielte, die einem einzelnen Gen/Protein zugeschrieben werden können. In den Frühphasen der Molekularbiologie hat sich dieser reduktionistische Ansatz als enorm leistungsstark und einflussreich erwiesen. Er ermöglichte die Entmystifizierung lebender Materie und stellte die gesamte moderne Biologie auf eine solide molekulare

und mechanistische Grundlage. Mit zunehmendem Wissen über zelluläre Systeme wurde jedoch immer deutlicher, dass dieser Blick die Komplexität der zellulären Mechanismen nicht angemessen beschreiben konnte. In der Tat lassen sich viele zelluläre Funktionen nicht einfach auf die Funktionen einzelner Proteine reduzieren, sondern ergeben sich erst aus dem Zusammenspiel mehrerer Komponenten. Das Gesamtsystem ist also mehr als die Summe seiner einzelnen Teile. In der Folge hat sich der Fokus in der biologischen Forschung allmählich von einzelnen Proteinen auf Proteingruppen oder -komplexe verschoben, die als Funktionseinheiten betrachtet werden.

Ein weiterer Grund für diese Verschiebung des Fokus' war das zunehmende Wissen über das hohe Ausmaß an Verbindungen zwischen Proteinen in einer Zelle, welche durch molekulare Untersuchungen zellulärer Prozesse entdeckt wurden. Insbesondere Hochdurchsatz-Techniken („-omik“-Technologien), die hochgradig parallelisierte experimentelle Analysen von Hunderten oder Tausenden von Interaktionen zwischen verschiedenen Proteinen ermöglichen, haben hochkomplexe Interaktionsnetze generiert, die oft Proteine bzw. Einheiten sehr verschiedener Funktionen miteinander verbinden. Die Interpretation der Bedeutung dieser Netzwerke über einzelne Interaktionen hinaus stellte eine enorme Herausforderung dar, die Ansätze erforderlich machte, die sich sehr von denen der konventionellen Molekularbiologie unterscheiden. All diese Entwicklungen führten zur Entstehung der Systembiologie – die man auch als Netzwerkbiologie bezeichnen kann – als einem unabhängigen Zweig der modernen biologischen Forschung.

## MATHEMATISCHE MODELLIERUNG IN DER SYSTEMBIOLOGIE

Wie jede neue Disziplin ist die Systembiologie bislang nicht streng definiert worden. In der einfachsten Definition kann jede Analyse, welche alle (oder zumindest mehrere) Gene oder Proteine berücksichtigt, die eine Rolle in einem zellulären Prozess spielen, als Systembiologie bezeichnet werden. In diesem Sinne ist die Systembiologie inzwischen ein üblicher Bestandteil der biologischen Forschung, die sich zunehmend auf neuartige „-omik“-Tools stützt. Mit diesen Techniken können jedoch nur deskriptive Darstellungen zellulärer Netzwerke erzeugt werden, die begrenzte Einsichten in deren Funktionen vermitteln. Beispielsweise erfolgt die Verbreitung eines Signals über ein Netzwerk, das Rezeptoren auf der Oberfläche der Zelle (Eingabe/ Input) mit der Genregulation oder dem Zellverhalten (Ausgabe/ Output) verbindet, häufig über mehrere Schritte und Verzweigungen. Zusätzlich kann diese Signalübertragung durch mehrere positive und negative Rückkopplungs (Feedback)-Schleifen moduliert werden. Obwohl man die Bedeutung einiger dieser regulierenden Verbindungen intuitiv ableiten kann, ist eine Vorhersage darüber, wie sich ein solches Netzwerk bei einer Stimulierung verhält, durch einfache Betrachtung der Netzwerkstruktur nicht oder nur begrenzt möglich.

Um diese Probleme zu lösen, sind mathematische Modelle und Computersimulationen biologischer Netzwerke besonders hilfreich. Während die mathematische Beschreibung natürlicher Prozesse ein grundlegender Bestandteil der Physik ist, ist die Anwendung mathematischer Modelle in der Biologie nach wie vor begrenzt und zum Teil umstritten. Ein Hauptproblem ist die offensichtliche Einzigartigkeit jedes einzelnen biologischen Netzwerkes, was impliziert, dass das aus einem Netzwerk erhaltene Wissen nicht ohne Weiteres auf ein anderes Netzwerk übertragen werden kann. Dies steht in starkem Kontrast zur Physik, wo Systeme gleicher Art mit demselben mathematischen Modell beschrieben werden können. Obwohl die eigentliche Modellierung eines zellulären Netzwerkes häufig relativ einfach mit einer Reihe gekoppelter gewöhnlicher Differenzialgleichungen erfolgen kann, sind in der Regel umfassende Kenntnisse über einzelne Reaktionsparameter innerhalb des Netzwerkes erforderlich, die über langwierige biochemische Experimente erworben werden müssen. Deshalb ist es unrealistisch, solche Informationsmengen für jedes einzelne zelluläre Netzwerk zu erhalten. Dies bedeutet, dass eine detaillierte Modellierung nur für eine relativ kleine Gruppe ausgewählter Netzwerke durchgeführt werden kann. Wenn auch alternative Ansätze der Modellierung möglich sind,

die nur die Struktur der Netzwerke verwenden und kein Wissen über detaillierte Parameter erfordern, so ist die Präzision dieser Modelltypen und ihr Vermögen, die Netzwerkreaktion auf bestimmte Stimuli oder Störungen zuverlässig vorauszusagen, sehr begrenzt.

Angesichts dieser Schwierigkeiten ist nicht zu erwarten, dass in naher Zukunft Computersimulationen biologische Experimente in dem Maße ersetzen können, wie dies in der Physik häufig der Fall ist. Dennoch sind mathematische Modelle zu zellulären Prozessen aus zwei Gründen sehr sinnvoll: Erstens können sie zeigen, ob das beobachtete Verhalten eines Netzwerkes mit dem aktuellen Wissen über die Struktur dieses Netzwerkes prinzipiell erklärbar ist. Überraschenderweise ist dies meistens nicht der Fall, wodurch deutlich wird, dass wesentliche Komponenten der Netzwerkstruktur in den meisten Fällen noch unbekannt sind. Häufig können mathematische Modelle auch auf eine wahrscheinlich fehlende Verbindung hinweisen, wie beispielsweise ein negatives Feedback innerhalb eines Netzwerkes. Der zweite Aspekt mathematischer Modelle ist, dass sie zur Entdeckung allgemeiner Eigenschaften in zellulären Netzwerken ein unerlässliches Werkzeug darstellen.

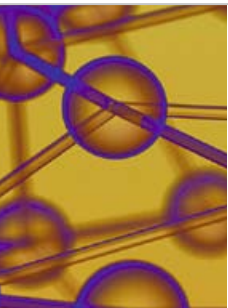
**HÄUFIG KÖNNEN MATHEMATISCHE MODELLE AUCH AUF EINE WAHRSCHEINLICH FEHLLENDE VERBINDUNG HINWEISEN, WIE BEISPIELSGEWISSE EIN NEGATIVES FEEDBACK INNERHALB EINES NETZWERKES.**

## EIGENSCHAFTEN VON ZELLULÄREN NETZWERKEN

Gibt es angesichts der Individualität jedes einzelnen zellulären Netzwerkes eindeutige Hinweise auf die Existenz von Eigenschaften, die gleichermaßen in verschiedenen Netzwerken zu finden sind? Diese Frage ist noch nicht abschließend beantwortet, aber aus der Untersuchung unterschiedlicher Systeme haben sich mehrere Eigenschaften herauskristallisiert, die allgemeiner Natur sein könnten.

Eine solche Eigenschaft, die den meisten Netzwerken gemein zu sein scheint, ist die Robustheit. Die Bedeutung der Robustheit – der Unempfindlichkeit gegenüber Störungen – für zelluläre Netzwerke ist nicht überraschend, sind diese Netzwerke doch extensiven internen und externen

Störungen ausgesetzt. Interne Störungen sind vielen biochemischen Reaktionen innerhalb der Zelle innewohnend, weil die meisten Reaktionen nur unter Beteiligung einer relativ kleinen Kopienzahl von Komponenten erfolgen. Obwohl sich die Durchschnittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Reaktion (z. B. Protein-Modifizierung) feststellen lässt, kann die Anzahl von Proteinen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt und in einer speziellen Region der Zelle tatsächlich kollidieren und miteinander reagieren, erheblich fluktuieren – typischerweise in der Größenordnung einer Quadratwurzel der Kopienzahlen der beteiligten Komponenten. Die resultierenden Fluktuationen im Output einer einzigen speziellen Reaktion können sich über die Netzwerke verbreiten und grundlegend das Netzwerkverhalten beeinträchtigen. In vielen Fällen können solche schnellen stochastischen Fluktuationen in der Netzwerkaktivität durch das geringere Tempo der nachgelagerten Output-Reaktionen „herausgefiltert“ werden. Das ist aber nicht immer der Fall. Insbesondere die Fluktuationen in der Aktivität der Gentranskription können eine beträchtliche Variabilität in den Kopienzahlen der Netzwerkproteine über die Zeit oder zwischen den Zellen einer Population untereinander erzeugen. Eine solche Variation, die als Genexpressionsrauschen bezeichnet wird, hat normalerweise direkte und lang anhaltende Effekte auf die Netzwerkleistung.



**BIOLOGISCHE NETZWERKE UNTERSCHIEDEN SICH NICHT WESENTLICH VON KOMPLEXEN, VON MENSCHEN GESCHAFFENEN SYSTEMEN, WIE STROMNETZEN ODER TRANSPORTNETZWERKEN.**

Neben einem solchen inhärenten stochastischen Rauschen wird die Netzwerkleistung grundsätzlich auch durch Änderungen im zellulären oder extrazellulären Umfeld beeinflusst. So variieren die Netzwerkkomponentenmengen nicht nur stochastisch, sondern auch deterministisch aufgrund von Änderungen in der Genregulation. Darüber hinaus wirken sich externe Faktoren wie Temperaturveränderungen auf das Tempo der meisten biochemischen Reaktionen aus, wobei sich die Aktivität eines „durchschnittlichen“ Enzyms bei zehn Grad Temperaturerhöhung verdoppelt. Das bedeutet, dass jedes zelluläre Netzwerk in einem Organismus ohne eine Körpertemperaturkontrolle durch einen täglichen oder saisonalen Temperaturzyklus stark beeinflusst wird.

Aus diesen Gründen ist es sehr wahrscheinlich, dass die Evolution Netzwerke nicht nur hinsichtlich der Durchführung ihrer speziellen Funktion selektiert hat (z. B. Signalübertragung), sondern auch bezüglich einer robusten Durchführung dieser Funktion, unabhängig von internen und externen Störungen. In dieser Hinsicht unterscheiden sich biologische Netzwerke nicht wesentlich von komplexen, von Menschen geschaffenen Systemen, wie Stromnetzen oder Transportnetzwerken, wo die Robustheit des Systems ein wesentlicher Bestandteil jeder technischen Konstruktion ist. Während die Grundsätze einer robusten Konstruktion technischer Systeme bekannt sind, bleiben die Mechanismen, die der Robustheit biologischer Netzwerke zugrunde liegen, noch aufzuklären.

Eine andere grundsätzliche Eigenschaft zellulärer Netzwerke ist ihre Modularität. Modularität bedeutet, dass Netzwerke, die bestimmte spezifische zelluläre Aufgaben durchführen (z. B. Teilung von Chromosomen während der Zellteilung), relativ isoliert sind und autonom voneinander fungieren. Netzwerkmodularität schafft im Wesentlichen eine Ebene an Funktionalität innerhalb der Zelle (Module), welche zwischen dem Proteinnetzwerk der Gesamtzelle und dem einzelner Proteine liegt. Auch hier finden sich Parallelen zur Technik: Die meisten komplexen Maschinen, etwa PKWs oder Flugzeuge, werden aus funktionellen Modulen zusammengebaut, die unabhängig vom Rest der Maschine optimiert, produziert, kontrolliert und ausgetauscht werden können. Die Vorteile eines modularen Designs biologischer Netzwerke sind wohl vergleichbar. Die Evolution optimiert die Funktionalität einzelner Module und verschaltet sie ohne große Auswirkungen auf den Rest des Netzwerkes neu oder tauscht sie aus. Modularität ermöglicht zudem die Feinabstimmung einzelner Funktionen und verbessert die Netzwerk-Robustheit, weil Störungen in einem Modul nicht automatisch auf den Rest des zellulären Netzwerkes übertragen werden.

#### VON DER SYSTEMBIOLOGIE ZUR SYNTHETISCHEN BIOLOGIE


Angesichts der Parallelen zwischen technischen Systemen und zellulären Netzwerken lag der natürliche nächste Schritt der Biotechnologie nahe, das rationale Design neuartiger zellulärer Netzwerke mit vorgegebenen Eigenschaften in Angriff zu nehmen. In einem gewissen Umfang erfolgen solche Arbeiten bereits seit Jahrzehnten in den Forschungsfeldern der Molekularbiologie, der Gentechnik und der Biotechnologie. Allerdings waren derartige Netzwerkmodifikationen typischerweise relativ einfach und betrafen lediglich den

Austausch oder die Einbringung eines oder sehr weniger Gene in einem Organismus. Die bisher erreichten Fortschritte in der Systembiologie versprechen die Biotechnologie zu revolutionieren, indem sie das Netzwerkdesign in Form der synthetischen Biologie auf ein qualitativ neues Niveau bringen. In ihrer Reinform, die zur Jahrhundertwende von ihren frühen Vertreter befürwortet wurde, sollte die synthetische Biologie eine echte technische Disziplin sein, in der das Netzwerkdesign unter Verwendung vollstandardisierter Teile mit Hilfe einer speziellen Software am Computer (*in silico*) erfolgt. Der Computer verifiziert dann die Funktionalität der konstruierten Netzwerke durch Verhaltenssimulationen – überwiegend vergleichbar mit den Vorgängen, die heute bei der Konstruktion eines Autos oder eines Flugzeuges zum Einsatz kommen. Bemerkenswerterweise hätte ein solches Design nicht notwendigerweise einen Bezug zu natürlich existierenden zellulären Netzwerken ähnlicher Funktion, sondern würde ein rein künstliches Netzwerk kreieren.

Schnell wurde jedoch deutlich, dass diese anfängliche Aussicht der synthetischen Biologie übermäßig optimistisch war. Ein solches rationales Design neuartiger Netzwerke muss eine ganze Reihe großer Herausforderungen überwinden. Es stellte sich heraus, dass die biologischen Bauteile extrem schwer zu standardisieren und von unerwünschten Einflüssen innerhalb der Zelle zu isolieren waren, die ihre Aktivitäten in unvorhergesehener Weise beeinträchtigten. Die *in silico* entwickelten Netzwerke waren deshalb in den meisten Fällen innerhalb der Zelle nicht funktional, weil die Proteinmengen oder -aktivitäten zu stark von den gewünschten Werten abwichen. Diese Probleme wurden mit einer zunehmend größeren Zahl von Netzwerkkomponenten immer offensichtlicher, da selbst kleinste Abweichungen vom gewünschten Verhalten innerhalb des Netzwerkes verstärkt wurden. Und selbst synthetische Netzwerke, die unter bestimmten Bedingungen funktionierten, wurden unter anderen Bedingungen funktionsunfähig, weil ihnen offensichtlich die benötigte Robustheit gegenüber Störungen fehlte. Folglich ist das rationale Design funktionaler synthetischer Netzwerke aktuell auf relativ einfache und kleine Systeme beschränkt, die nicht annähernd die Komplexität der meisten natürlichen zellulären Netzwerke aufweisen.

#### **DIE REGELN ZELLULÄRER NETZWERKE**


Diese offensichtliche Diskrepanz zwischen den natürlichen Netzwerken und unseren derzeitigen Möglichkeiten im künstlichen Netzwerkdesign zeigt uns, dass wir noch immer nicht verstehen, was ein funktionales Netzwerk ausmacht. Es ist zwar unstrittig, dass die Biologie nicht auf eigenen



**ZELLULÄRE SYSTEME KANN MAN SICH ALS EINE ART SPRACHE VORSTELLEN – MIT EINZELNEN AMINOSÄUREN ALS BUCHSTABEN, PROTEINEN ALS WÖRTERN UND DER GESAMTEN ZELLE ALS TEXT.**

– über die Gesetze der Physik hinausgehenden – Sondergesetzen beruht. Dennoch könnte es bestimmte Regeln geben, welche dem evolvierten Design zellulärer Netzwerke zugrunde liegen. Im Gegensatz zu den von Menschen hergestellten Maschinen, deren Konstruktionsregeln rational festgelegt werden, könnten die Regeln für das zelluläre Netzwerkdesign natürlicherweise als Produkt des evolutionären Selektionsprozesses entstehen. Der Prozess der natürlichen Netzwerk-Modifizierung ist zwar nicht gerichtet, sondern geschieht durch zufällige Modifikation bestehender Teile oder Zugabe neuer Teile und Module, aber die Evolution selektiert letztlich solche Netzwerke aus, die ihre Funktion unter physiologischen Beschränkungen, die die Netzwerkfunktion in der Zelle grundsätzlich beeinflussen, optimal erfüllen. So können beispielsweise Netzwerke danach ausgewählt werden, ob sie die Kriterien der Robustheit und der Modularität, wie oben erwähnt, erfüllen. Trotz der scheinbaren Zufälligkeit des Evolutionsprozesses kann die Auswahl dennoch zu bestimmten gemeinsamen Regeln darüber führen, wie ein evolutionär erfolgreiches Netzwerk strukturiert ist und funktioniert.

Um diese Thematik zu veranschaulichen kann man gewisse Parallelen zur menschlichen Sprache ziehen. Zelluläre Systeme kann man sich als eine Art Sprache vorstellen – mit einzelnen Aminosäuren als Buchstaben, Proteinen als Wörtern und der gesamten Zelle als Text. In dieser Struktur repräsentieren zelluläre Netzwerke oder Module, die bestimmte Funktionen ausführen, die Sätze. Die Sätze einer Sprache werden nach bestimmten Regeln konstruiert – wenn auch kein Naturgesetz zwingend dafür sorgt, dass sprachliche Sätze eine bestimmte grammatikalische Struktur annehmen. Dennoch können Grammatikregeln infolge unserer kognitiven Prozesse auf natürlichem Wege entstehen, wie es in dem Konzept der Universalgrammatik von Noam Chomsky vorgeschlagen wurde. In vergleichbarer Weise könnten infolge der Art des Evolutionsprozesses und genereller Einschränkungen der Netzwerkfunktionen universelle Regeln entstehen, die für die Organisation zellulärer Netzwerke gelten.



**MIKROORGANISMEN SIND DIE EINZIGEN ORGANISMEN, DIE DIE ERDE WÄHREND DES GROSSTEILS IHRER GESCHICHTE BEVÖLKERT HABEN UND DIE DESHALB EVOLUTIONÄR WESENTLICH ÄLTER ALS TIERE UND PFLANZEN SIND.**

Wie können diese Regeln verstanden werden? Ähnlich wie in der Sprachanalyse müsste auch hier der erste Schritt darin bestehen, eine ausreichende Anzahl von „Sätzen“ – Beispielen zellulärer Netzwerke – mit Hilfe einer Kombination aus experimentellen und rechnergestützten Methoden zu analysieren. Experimentell würde dies erfordern, die Struktur eines Netzwerks (d. h. Protein-Protein-Interaktionen und Protein-Reaktionen) abzubilden und zu erforschen, wie diese Interaktionen durch Stimulierung oder Störung des Netzwerkes, beispielsweise durch Änderungen in der Menge oder in den Aktivitäten einzelner Proteine, beeinträchtigt werden. Mit Hilfe einer computergestützten Analyse müsste man dann aus der Struktur und Funktion einzelner Netzwerke – trotz ihrer Verschiedenheit – allgemeine Regeln extrahieren. Solche Analysen können dazu beitragen aufzuklären, was für die Robustheit oder Modularität von Netzwerken verantwortlich ist. Die computergestützte Analyse kann zudem dazu benutzt werden, den gesamten Raum möglicher Netzwerke zu erforschen, die eine spezielle Funktion erfüllen können - durch eine zufällige Neuerschaltung eines Satzes von Proteinen und nachfolgende *in silico*-Überprüfung ihrer Funktionen in einem Prozess, der der natürlichen Evolution ähnelt. Netzwerke, die die gewünschte Funktionalität aufweisen, könnten weiter auf ihre Sekundäreigenschaften getestet werden, etwa Robustheit, und dann mit den natürlichen Netzwerken derselben Funktion verglichen werden. Idealerweise würden sich diese beiden Gruppen überlappen und bestätigen, dass wir verstehen, wie diese natürlichen Netzwerke durch die Evolution ausgewählt werden. Das sollte uns in die Lage versetzen, weitere grundsätzliche Prinzipien evolutionärer Netzwerkdesigns zu entdecken – was nicht nur für die synthetische Biologie, sondern auch für die Technik nützlich wäre.

#### MIKROORGANISMEN ALS MODELLSYSTEME

Die Aufklärung der gemeinsamen Prinzipien hinter natürlichen intrazellulären Netzwerken und der Regeln ihrer evolutionären Entwicklung würde einen riesigen Fortschritt für die Erforschung aller zellulären Organismen bedeuten. In dieser Hinsicht sind Mikroorganismen besonders attraktive Modelle für die System- und die synthetische Biologie. Insbesondere sind ihre zellulären Netzwerke – speziell in Bakterien – bedeutend einfacher als die in Tier- oder Pflanzenzellen. In Kombination mit dem Vorteil einer wesentlich einfacheren genetischen Manipulation in mikrobiellen Modellen hat dies zur Folge, dass die Funktion dieser Netzwerke tatsächlich in sehr hoher Detailgenauigkeit analysiert werden kann, und zwar sowohl experimentell als auch computergestützt. Darüber hinaus sind die Funktionen von Netzwerken in Mikroorganismen typischerweise einfacher zu definieren, wobei die meisten von ihnen direkt an der Wahrnehmung der Zellumgebung oder des Zustandes innerhalb der Zelle beteiligt sind. Letztlich sind Mikroorganismen die einzigen Organismen, die die Erde während des Großteils ihrer Geschichte bevölkert haben und die deshalb evolutionär wesentlich älter als Tiere und Pflanzen sind. Die evolutionäre Optimierung mikrobieller Netzwerke hat also vermutlich bereits zu einer bestmöglichen Lösung geführt. Diese definierten Funktionen und die angenommene Optimalität erleichtern theoretische Analysen der Netzwerke, da wir wissen (oder zumindest annehmen können), welche Eigenschaften und Funktionen des Netzwerkes evolutionär ausgewählt wurden und wie die Evolution diese Fragen gelöst hat.

## AUSSICHT

Die Forschungsfelder der Netzwerkanalyse und des Netzwerkdesigns, die Systembiologie und die synthetische Biologie entwickeln sich zur Reife. Ihre Geburtsstunde zur Jahrhundertwende wurde von großem Enthusiasmus, aber auch von Skepsis begleitet. Die frühzeitigen Versprechen, die Systembiologie könne innerhalb eines Jahrzehnts einen Großteil der routinemäßigen Experimente ersetzen, wirken rückblickend etwas naiv. Fortschritte im Verständnis zellulärer Netzwerke stammen größtenteils noch immer aus molekularbiologischen oder biochemischen Untersuchungen, welche in kleinerem Maßstab und detailfokussiert durchgeführt werden. Dennoch hat die Systembiologie die biologi-

sche Forschung transformiert, indem sie den Schwerpunkt von den Molekülen auf die Netzwerke verlagert hat und die Bedeutung der quantitativen Analyse betont. Und obwohl die aktuellen Errungenschaften der synthetischen Biologie im Vergleich zu den anfänglich definierten Zielen relativ bescheiden sind, wird die Untersuchung zellulärer Netzwerke aus der Ingenieurs-Perspektive einen langanhaltenden transformierenden Effekt auf die Biologie haben. Diese Änderungen mögen derzeit noch nicht offensichtlich sein. Sie werden aber dazu beitragen, die Zellbiologie auf eine solidere theoretische Grundlage zu stellen und eine Reihe von empirischen Regeln zu generieren, die für das Verständnis und die Entwicklung zellulärer Netzwerke verwendet werden können.

## INFORMATIONSEITE ZUR SYNTHETISCHEN BIOLOGIE

Gemeinsam mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung hat die Max-Planck-Gesellschaft mit Beginn des Jahres 2015 ein Forschungsprogramm zur synthetischen Biologie aufgelegt: MaxSynBio.

Begleitend zu diesem Forschungsprogramm wurde das Informationsportal [www.synthetische-biologie.mpg.de](http://www.synthetische-biologie.mpg.de) gestartet.

Dieses bietet umfassende Informationen zu Grundlagen und Anwendungen, aber auch den ethischen und rechtlichen Aspekten dieses Forschungsfeldes.

VICTOR SOURJIK

MAX PLANCK INSTITUTE FOR TERRESTRIAL MICROBIOLOGY, MARBURG

## Rules for Cooperation in the Cell

Proteins in the cell never act alone. Even the simplest cellular functions, such as transport of a molecule across the cellular membrane or defining the site of future cell division, are normally executed by groups of interacting proteins. These groups are best represented as protein networks, where nodes correspond to individual proteins and edges represent their interactions. The more complex the task, the larger and more complex is the underlying network, and ultimately all functional networks can be connected into a cell-wide network. The next big challenges for biology is to understand the rules by which these functional networks operate in the context of a living cell and to use these rules to rationally engineer the functions of networks.

### FROM MOLECULAR BIOLOGY TO SYSTEMS BIOLOGY


Although a network-centred view of cell biology has become increasingly accepted in recent years, it represents a dramatic paradigm shift that still remains to be fully appreciated. Over much of their existence, molecular biology and biochemistry have primarily focused on the analysis of individual genes or proteins, following an approach that aimed at decomposing cellular processes into elementary functions that can be ascribed to a single gene/protein. This reductionist attitude was immensely powerful and influential in the early stages of molecular biology, enabling demystification of living matter and putting all modern biology on a solid molecular and mechanistic foundation. However, with

Another reason for the shift in focus was the increasing awareness of the extent of interconnections between proteins in a cell, which started to emerge from molecular studies of cellular processes. In particular, high-throughput techniques ("omics"), which enable highly parallelized experimental analysis of hundreds or thousands of interactions between different proteins, have produced highly complex interaction networks, frequently connecting proteins of very different functions. Interpreting the significance of these networks beyond individual interactions presented a formidable challenge, requiring approaches that were different from those provided by conventional molecular biology. All of these developments led to the emergence of systems biology – which could also be called network biology – as an independent branch of modern biological research.

### MATHEMATICAL MODELLING IN SYSTEMS BIOLOGY

As any new discipline, systems biology has not yet been strictly defined. In the simplest definition, any analysis that takes into account all (or at least multiple) genes or proteins that play a role in a particular cellular process can be viewed as systems biology. In this sense, systems biology has already become well embedded in current biological research, which increasingly relies on novel "omics" tools. These techniques, however, can only sketch out maps of cellular networks providing limited insights into their function. For example, propagation of a signal through a network that links receptors on a surface of the cell (input) to gene regulation or cell behaviour (output) frequently proceeds in multiple steps and via several branches. Additionally, such signal transduction can be modulated by multiple positive and negative feedback loops. Although one may be able to intuitively guess the significance of some of these regulatory connections, predicting how such a network will behave upon stimulation by simply looking at it is not possible.

Solving these questions will require mathematical modelling and computational simulations of biological networks. While the mathematical description of natural processes is a fundamental part of physics, the application of mathematical modelling in biology remains limited and sometimes controversial. A major problem here is the apparent uniqueness of each and every biological network, so that the knowledge coming from one network cannot be easily transferred to another network. This is in stark contrast to physics, where systems of the same type can be described using the same mathematical model. Moreover, although in many cases modelling of a cellular network can be easily done using a set of coupled ordinary differential equations, it normally requires a large body



**THE MORE COMPLEX THE TASK, THE LARGER AND MORE COMPLEX IS THE UNDERLYING NETWORK, AND ULTIMATELY ALL FUNCTIONAL NETWORKS CAN BE CONNECTED INTO A CELL-WIDE NETWORK.**

the growing knowledge of cellular systems, it became more and more apparent that this view could not adequately describe the complexity of cellular mechanisms. Indeed, many cellular functions simply cannot be reduced to functions of individual proteins but only emerge from the interplay between multiple components, i.e. the whole system is more than the sum of its individual parts. As a consequence, the focus of biological research started to gradually shift from individual proteins to groups or complexes of proteins taken as functional units.

of knowledge about individual reaction parameters within the network that must be obtained through tedious biochemical experiments. Thus it is simply unrealistic to obtain such an amount of information for each and every cellular network, meaning that the detailed modelling can be only performed for a relatively small set of selected networks. Although alternative approaches to modelling exist, which only use the structure of the networks and do not require knowledge of detailed parameters, the precision of these types of models and their capability to reliably predict the network response to particular stimuli or perturbations is limited.

Given these difficulties, one cannot expect that in the near future computational simulations replace biological experiments in the same way that they do in physics. Nevertheless, mathematical models are very useful for two purposes: First, they provide a clear test as to whether the observed network behaviours can in principle be explained by the current knowledge of the network structure. Surprisingly, in most cases this is not the case, meaning that we still lack essential components of the network structure. Frequently, mathematical models can also point to a likely missing connection, such as a negative feedback within a network. Second, the mathematical models are essential to elucidate general properties of cellular networks.

### PROPERTIES OF CELLULAR NETWORKS

Given the apparent individuality of each and every cellular network, are there clear reasons to expect the existence of properties that most networks share? Although the question is still open, several such general features have become apparent from studies of different systems.

One such property, which seems to be common to most networks, is robustness. The importance of robustness – insensitivity to perturbations – for cellular networks is not surprising, given that these networks are exposed to extensive internal and external perturbations. Internal perturbations are inherent to biochemical reactions within the cell because most reactions involve only a relatively small copy number of components. Although the average probability of a given reaction (e.g., protein modification) to occur may be fixed, the number of proteins that actually collide and react with each other at a given time point and in a particular region of the cell may fluctuate substantially, with the noise typically scaling as the square root of the copy numbers of the involved components. The resulting fluctuations in the output of one particular reaction can propagate through the networks and generally affect the network behaviour.

Although in many cases such rapid stochastic fluctuations in the network activity can be “filtered out” by the slower rate of the downstream output reactions, this is not always the case. Particularly the fluctuations in the activity of gene transcription can produce sizable variability in the copy numbers of the network proteins over time or across the cells in a population. Such variation (referred to as gene expression noise) normally has direct and long-lasting effects on the network performance.

In addition to such inherent stochastic noise, network performance is generally affected by changes of the cellular or extracellular environment. For example, the levels of the network components vary not only stochastically but also deterministically due to changes in gene regulation. Moreover, such external factors as changes in temperature affect rates of most biochemical reactions, with activity of an “average” enzyme doubling for each ten degrees of a temperature change. This means that every cellular network in an organism without a body temperature control will be severely perturbed by a daily or a seasonal temperature cycle.

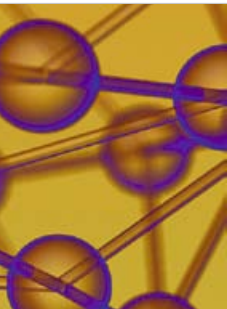
**FREQUENTLY, MATHEMATICAL MODELS CAN ALSO POINT TO A LIKELY MISSING CONNECTION, SUCH AS A NEGATIVE FEEDBACK WITHIN A NETWORK.**

As a consequence, it is highly likely that evolution has selected networks not only for performing their specific function (e.g., transducing a signal), but also for performing this function robustly, irrespective of internal and external perturbations. In this respect, biological networks are not fundamentally different from complex man-made systems, such as electrical grids or transportation networks, where the system’s robustness is an essential part of its engineering design. However, whereas the principles of robust design of engineered systems have been established, the mechanisms that underlie robustness of biological networks remain to be understood.

Another fundamental property of cellular networks is their modularity. Modularity essentially means that cellular networks that execute specific cellular tasks (e.g., partitioning of chromosomes during cell division) are relatively insulated and function autonomously from each other. Network



modularity essentially creates a level of functionality within the cell (modules) that is intermediate between the whole-cell protein network and individual proteins. This again finds clear parallels in engineering, where most complex machines, such as cars or airplanes, are built from functional modules that can be optimized, produced, controlled and exchanged independently from the rest of the machine. The advantage of modular design of biological networks is arguably the same, with evolution optimizing the functionality of individual modules, rewiring and also exchanging them without much effect on the rest of the network. The modularity further facilitates tuning of individual functions and enhances network robustness, because perturbations in one module do not propagate to the rest of the cellular network.



**BIOLOGICAL NETWORKS ARE NOT FUNDAMENTALLY DIFFERENT FROM COMPLEX MAN-MADE SYSTEMS, SUCH AS ELECTRICAL GRIDS OR TRANSPORTATION NETWORKS.**

### FROM SYSTEMS TO SYNTHETIC BIOLOGY

Given the parallels between the engineered systems and cellular networks, the natural step in bioengineering was to attempt rational design of novel cellular networks with predetermined properties. At a certain level, such work has been already going on for decades in the fields of molecular biology, genetic engineering and biotechnology. However, such network modifications were typically fairly simple, with just one or a few genes being replaced or inserted within an organism. The advances in systems biology thus far promise to revolutionize biotechnology, advancing network design to a qualitatively new level in the form of synthetic biology. In its pure form, which was promoted by its early proponents at the turn of this century, synthetic biology would be a truly engineering discipline, where the network design from fully standardized parts would be done by computer (*in silico*) using a specialized software. The computer would further verify the functionality of the designed networks by simulating their behaviour – in much the same way as a car or an airplane is designed nowadays. Importantly, such design would not necessarily have anything to do with the naturally existing cellular networks of a related function, but would create a fully artificial network.

It rapidly became clear that this initial promise of synthetic biology was overly optimistic. Such rational design of novel networks needs to overcome a number of formidable challenges. The biological parts proved to be extremely difficult to standardize and to insulate from the undesirable influences within the cell, which affected their activities in unpredictable ways. As a result, the networks that were designed *in silico* were in most cases non-functional within the cell, because the protein levels or activities deviated too strongly from desired values. These problems became increasingly apparent with a larger number of network components, since even modest deviations from the desired behavior became amplified within the network. Moreover, even those synthetic networks that did function under specific conditions became non-functional under different conditions, obviously lacking robustness to perturbations. As a consequence, current rational design of functional synthetic networks is limited to relatively small and simple circuits, not even approaching the complexity of most natural cellular networks.

### RULES OF CELLULAR NETWORKS

This obvious discrepancy between the natural networks and our current achievements in artificial network design emphasizes that we still do not understand what constitutes a functional network. While it is clear that biology does not have its own special laws – beyond the laws of physics – there might well be certain rules behind the evolved design of cellular networks. Different from the man-made machinery, where the design rules are established rationally, the rules for the cellular network design could emerge naturally as the product of the evolutionary selection process. Although the process of network modification is not directional and occurs by random modification of existing parts or addition of new parts and modules, evolution ultimately selects for those networks that optimally perform their function under physiological constraints that generally affect network function in the cell. For example, networks may be selected for meeting the criteria of robustness and modularity mentioned above. Despite the apparent randomness of the evolutionary process, such selection may nevertheless result in certain common rules of how an evolutionary successful network is structured and functions.

To illustrate this, one can draw certain parallels to human language. Indeed, cellular systems can be thought of as a kind of language, with individual amino acids as letters, proteins as words, and the entire cell as a text. In this scheme, cellular networks or modules executing particular functions will represent sentences. Sentences in a human language

are constructed according to certain rules – although there is no natural law that enforces language sentences to have a particular grammatical structure. Nevertheless, grammatical rules may naturally emerge as a result of our cognitive processes, as has been proposed in Noam Chomsky's concept of universal grammar. Similarly, universal rules that govern the organization of cellular networks might emerge as a result of the nature of the evolutionary process and of general constraints on the network functions.

How can these rules be understood? Again similar to language analysis, the first step must be to analyse a sufficient number of "sentences" – examples of cellular networks – using a combination of experimental and computational methods. Experimentally, it would require mapping the structure of a network (i.e., protein-protein interactions and protein reactions) and exploring how these interactions are affected by the stimulation or perturbation of the network, such as changes in the levels or activities of individual proteins. Computational analysis is then necessary to extract general rules from the structure and function of individual networks, despite their dissimilarity. Such analyses can help to understand what it is that ensures the robustness or modularity of a network. Secondly, the computational analysis can also be used to explore the whole space of possible networks that may perform a particular function – by randomly rewiring a set of proteins and subsequently testing their functions *in silico*, in a process that resembles natural evolution. Those networks that happen to show proper functionality can be further tested for their secondary properties, such as robustness, and subsequently compared to the natural networks with the same function. Ideally, these two sets would overlap, demonstrating that we understand how these natural networks are selected by evolution. This should enable us to uncover further general principles of the evolutionary network designs – which might be useful not only for synthetic biology but also for engineering.

### **MICROORGANISMS AS MODEL SYSTEMS**

Learning the common principles behind natural networks and the rules of their evolutionary design will mean a huge advance for studies of any cellular organism. To this end, microorganisms are particularly attractive models for systems and synthetic biology. First and foremost, their cellular networks – particularly those in bacteria – are significantly simpler than those in animal or plant cells. Along with the advantage of much easier genetic manipulation in microbial models, this means that the operation of these networks can indeed be analysed at very high detail both experimentally

and computationally. Moreover, the functions of the networks are typically more easily defined in microorganisms, with most of them being directly involved in sensing either the extracellular environment or the intracellular cell state. Finally, microorganisms have been the only organisms that have populated the Earth for most of its history and are thus evolutionarily much older than animals or plants. This means that the evolutionary optimization of microbial networks has proceeded for much longer and has presumably converged to a (locally) best possible solution. Such defined functions and presumed optimality facilitate theoretical analysis of these networks, since we know (or at least can guess) what properties and functions of the network were evolutionarily selected and how evolution has solved these questions.

**MICROORGANISMS HAVE BEEN THE ONLY ORGANISMS THAT HAVE POPULATED THE EARTH FOR MOST OF ITS HISTORY AND ARE THUS EVOLUTIONARILY MUCH OLDER THAN ANIMALS OR PLANTS.**

### **OUTLOOK**

The fields of network analysis and design, systems and synthetic biology, are becoming mature. Their birth around the turn of this century was met with much enthusiasm but also with scepticism. The early promises of systems biology replacing much of the routine biological experimentation within a decade in hindsight look indeed rather naïve. The progress in understanding cellular networks still largely comes from small-scale molecular biology and biochemistry experiments that focus on details of specific processes. Nevertheless, systems biology has transformed biological research, by shifting its focus from molecules to networks and by emphasizing the importance of quantitative analysis. Similarly, although the current achievements of synthetic biology are relatively modest in comparison to the initially defined goals, thinking about cellular networks from the engineering perspective will have a long-lasting transformative effect on biology. These changes may not be apparent at present, but they will help to put cell biology on more solid theoretical footing, creating a set of empirical rules that can be used to understand and design cellular networks.

