

DRIVEN

by
maxon

60 Years
of Excellence
Est. 1961

**Selbstheilende Haut:
Wie man Robotern
körperliche Intelligenz
schenkt** s.30

**Magnetwirkung:
Wo es gerade alle
Robotik-Experten
hinzieht** s.35

Was Roboter bewegt

- 4 Moment
- 6 News
- 11 Neue Produkte

14 Fokus

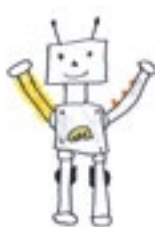
Was Roboter bewegt



14 Sie sind überall!
Wie Roboter unseren Alltag erobern.



35 Alle wollen nach Zürich!
Unterwegs im Robotik-Hub der Schweiz.



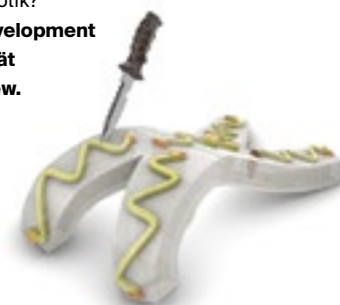
20 Malerische Zukunft
Wie unsere Kinder Roboter sehen.



24 Die Megatrends der Robotik?
Der Leiter Business Development Robotik bei maxon verrät sie im grossen Interview.



44 ChatGPT-Moment!
10 Erkenntnisse vom Tech Summit in Davos.



30 Heilende Haut
Der nächste grosse Wurf in der Robotik?



40 Expertise: Fingerübung
Gibt es die perfekte Hand?



48 Bewegte Systeme
Robotiklösungen von maxon im Überblick.

- 32** Glossar der Robotik
Kennen Sie diese Begriffe?
- 42** Verantwortung
Wie uns autonome Systeme herausfordern.
- 50** Kolumne

Die Helden der Ausgabe



DER INDUSTRIELLE



IDX SERVOMOTOREN

→ Für mobile Roboter und autonome Fahrzeuge.

Seiten 8, 11, 48

WHEEL DRIVE

→ Stellt sicher, dass Logistik-Roboter vorwärts kommen.

Seiten 10, 48

DER BEWEGLICHE



DER GELENKIGE



HIGH EFFICIENCY JOINT

→ Sorgt dafür, dass Roboter in Bewegung bleiben.

Seiten 29, 35, 48

DER GENAUE



HIGH PRECISION JOINT

→ Für Anwendungen, bei denen Genauigkeit zählt - etwa Chirurgie-roboter

Seite 48



Eugen Elmiger
CEO maxon Group

Technologie, die Robotik in Bewegung bringt

Kaum ein Technologiethema sorgt derzeit für so viel Aufmerksamkeit wie die Robotik. Ein Roboter ohne Bewegung bleibt allerdings unvollständig – genau hier liegt die Kernkompetenz von maxon.

Es freut mich sehr, dass unsere Produkte in der Robotikbranche auf grosses Interesse stossen. Ein aktuelles Beispiel ist unser Robotikgelenk High Efficiency Joint (HEJ). Dieses Produkt ist das Ergebnis jahrelanger Forschung, geprägt von Beharrlichkeit, dem Ideenreichtum unserer Teams und einer leistungsfähigen Fertigung. Heute verfügen wir über eine dedizierte Produktionslinie für die HEJ, welche auf die Skalierung steigender Stückzahlen ausgelegt ist.

Robotik ist für maxon kein Trend, sondern seit Jahrzehnten ein zentrales Thema. So sind wir seit 1998 in der humanoiden Robotik aktiv. Als Honda seinen bekannten Humanoiden «ASIMO» entwickelte, kamen darin ECi-Antriebe von maxon zum Einsatz, die wir heute in Korea produzieren.

Was uns bei maxon besonders antreibt, ist die Überzeugung, mit unserer Technologie den Fortschritt der Menschheit mitzugestalten. Das Potenzial der Robotik ist diesbezüglich enorm. Die vorliegende Ausgabe unseres Kundenmagazins widmet sich diesem spannenden Feld und zeigt, wie wir bei maxon die Zukunft der Robotik voranbringen.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre.

IMPRESSUM

Herausgeber: maxon Group, Brünigstrasse 220, 6072 Sachseln, Schweiz; driven@maxongroup.com / Redaktion: The maxon Newsroom, Sven Gallinelli (Redaktionsleitung), Urs-Ueli Schorno / Realisation: Studio Edit GmbH, Zürich: Katharina Rilling (Projektleitung), Peter Kruppa (Creative & Art Direction) / Druck: Druckerei Odermatt AG / Erscheinungsweise: einmal pro Jahr / Sprachen: Deutsch, Englisch, Chinesisch

© 2026 maxon. Alle Rechte vorbehalten.

2026-1 / Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung.

Fotos: maxon



Mehr spannende News,
Stories und Fachberichte
finden Sie auf:
maxongroup.com

FOLGEN SIE UNS





Alltagsmoment: ESA-Raumfahrer- Anwärter Marco Sieber zu Besuch bei maxon

Im Januar 2026 durfte maxon einen besonderen Gast am Hauptsitz in Sachseln (Schweiz) begrüßen: Marco Sieber, Raumfahrer-Anwärter der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) und voraussichtlich der zweite Schweizer im All, besuchte maxon für einen intensiven Austausch über Raumfahrt, Technologie und die Zukunft der Exploration. Der Besuch kam dank einer persönlichen Verbindung zustande – ein Armeekamerad von Marco Sieber arbeitet bei maxon. Während seines Rundgangs besuchte Marco Sieber unter anderem die Teams von maxon Medical und dem maxon SpaceLab, wo er sich über aktuelle Projekte und technologische Entwicklungen informierte. Der direkte Austausch mit den Ingenieur:innen sorgte auf beiden Seiten für inspirierende Gespräche.



Generationenwechsel bei maxon

maxon Hauptaktionär Dr. Karl-Walter Braun übergibt Verwaltungsratspräsidium an seine Tochter Dr. Bianca Braun

Wer bei maxon arbeitet, bleibt dem Unternehmen oft über viele Jahre treu. Das durchschnittliche Dienstalter in den Schweizer maxon Gesellschaften liegt bei knapp über neun Jahren. Auch der Hauptaktionär der maxon Gruppe, Dr. Karl-Walter Braun, trägt zu diesem Schnitt bei: Er ist 1977 offiziell in die Firma eingetreten und darf 2026 sein 49. Dienstjahr begehen;

2025 feierte er zudem seinen 80. Geburtstag. Nun ist für ihn der Zeitpunkt gekommen, den Generationenwechsel im Unternehmen voranzubringen. Per Juni 2026 übergibt er das Verwaltungsratspräsidium an seine Tochter Dr. Bianca Braun, bleibt aber Mitglied des Verwaltungsrats.

Dr. Karl-Walter Braun: «Ein gelungener Generationenwechsel ist keine Selbstverständlichkeit. Ich freue mich sehr, dass Bianca nun nachrückt. Sie hat dazu das nötige Rüstzeug und kennt das Unternehmen seit vielen Jahren aus verschiedenen Perspektiven.»

Bianca Braun hat bereits vor und während ihrem Studium in den Produktionsabteilungen von maxon ausgeholfen. Seit 2007 ist sie Mitglied des Verwaltungsrats, ab 2012 übernahm sie operative Verantwortung als Leiterin Group Audit and Consulting.

Bianca Braun, Jahrgang 1978, verbrachte ihre Schuljahre in den Kantonen Obwalden und Zug. Sie studierte Technology Management an der Hochschule St. Gallen und promovierte über familiengeführte Unternehmen. Dr. Bianca Braun sagt: «Familiengeführte Firmen sind ein Erfolgsmodell, dafür ist maxon das beste Beispiel – denn wir denken langfristig. Das war auch die Devise meines Vaters, der das Unternehmen umsichtig entwickelt und gemeinsam mit dem Management zur heutigen Grösse geführt hat. Diesen Kurs will ich weiterverfolgen und gleichzeitig neue Akzente setzen.»

Robotik

maxon und Pegatron treiben mobile Robotik gemeinsam voran

An der Computex Taipei 2026 präsentierte das taiwanische Technologieunternehmen Pegatron die zweite Generation seiner vierbeinigen Roboterplattform, «SIMBA II». Für die Bewegungssteuerung setzt das Unternehmen auf den High Efficiency Joint 90 (HEJ 90) von maxon. Das kompakte Gelenksystem vereint Motor, Getriebe und Steuerung in einer integrierten Einheit. Es liefert hohe Drehmomente bei präziser Bewegungsführung und erfüllt damit die Anforderungen moderner mobiler Robotersysteme. Gerade bei vierbeinigen Robotern sind leistungsfähige und gleichzeitig effiziente Antriebslösungen entscheidend, um dynamische Bewegungen und einen zuverlässigen Betrieb zu ermöglichen.

Die partnerschaftliche Zusammenarbeit verbindet die langjährige Erfahrung von maxon in der Präzisionsantriebstechnik mit der Entwicklungs- und Fertigungskompetenz von Pegatron. Gemeinsam wollen die beiden Unternehmen die Weiterentwicklung intelligenter mobiler Roboter für industrielle, kommerzielle und spezialisierte Anwendungen vorantreiben.

Für maxon unterstreicht das Projekt die wachsende Bedeutung integrierter Antriebssysteme in der Robotik. Statt einzelner Komponenten rücken zunehmend komplette mechatronische Subsysteme in den Fokus.



Anlässlich der Vorstellung von SIMBA II trafen sich (im Bild von links) Pegatron-Co-CEO Gary Cheng, Joe Chan, General Manager von maxon Taiwan, Pegatron-Chairman T.H. Tung, Eugen Elmiger, CEO maxon Group sowie Pegatron-Co-CEO Johnson Teng.



Solar Butterfly

Louis Palmer beendet Weltreise, doch die Mission geht weiter

Der Solarpionier Louis Palmer hat sein Projekt «Solar Butterfly» abgeschlossen. Das von maxon unterstützte Projekt hatte zum Ziel, mit einem solarbetriebenen Fahrzeug einmal rund um die Welt zu fahren, für Klimathemen zu sensibilisieren und auch Vorzeigeprojekte zu besuchen, die neue Lösungen im Umgang mit Klimathemen erörtern. Seit 2022 wurden im Rahmen des Projekts über 100 000 Kilometer zurückgelegt.

Zum Abschluss seines Projekts schaute Louis Palmer auch am maxon Hauptsitz in Sachseln (Schweiz) vorbei und hielt dort einen Vortrag über die Erkenntnisse seines Projekts. Im Zentrum seines Vortrags stand eine klare Botschaft: Die technologischen Lösungen für den Klimaschutz existieren bereits. Gleichzeitig stellte Palmer die Frage, warum wir unser Verhalten dennoch nur zöger-

lich anpassen. Ein möglicher Grund liegt für ihn in der menschlichen Natur: «Etwas zu tun, das uns heute einschränkt, aber erst in Jahrzehnten wirkt, erfordert aktives Gegensteuern.»

Besonders eindrücklich waren die Beispiele aus aller Welt: von grossen Solarkraftwerken in Indien über Solarautos mit hoher Reichweite bis hin zu innovativen Ansätzen in der Landwirtschaft und nachhaltigen Materialien.

Zentrales Anliegen von Solar Butterfly war und ist die Bildungsarbeit. Louis Palmer besucht mit dem Fahrzeug regelmässig Schulen und hat bereits 70 000 Kinder erreicht – bis Ende 2026 sollen es gar 100 000 sein. Und das nicht ohne Grund, so Louis Palmer, denn: «Kinder können das besser aufnehmen als Erwachsenen.»

Formula Student

AMZ Racing präsentierte Rennwagen «Nera»



Das studentische Formula Student Team von AMZ Racing hat die Saison 2026 mit dem Rennwagen Nera bestritten. Entwickelt innerhalb von weniger als einem Jahr, ist Nera bereits der 19. Rennwagen des Teams von ETH Zürich und Hochschule Luzern, der auf die Rennstrecke ging.

Wie bei AMZ Racing üblich trägt auch das neue Fahrzeug den Namen eines Berggipfels: Die Roccia Nera ist ein 4 075 Meter hoher Gipfel im Breithorn-Massiv an der Grenze zwischen der Schweiz und Italien.

Nera bringt mehrere technische Neuerungen mit:

- **Carbon-Monocoque-Chassis mit einem Gewicht von nur 17,3 kg**
- **Neu entwickelte, vollständig mechanische Radaufhängung mit 30 % Gewichtsreduktion**
- **Vier gemeinsam mit maxon weiterentwickelte Motoren mit je 43,5 kW Leistung bei 28 000 U/min und nur 2,46 kg Gewicht pro Einheit**

maxon unterstützt AMZ Racing weiterhin als einer der Hauptsponsoren. Besonders eng ist die Zusammenarbeit bei der Weiterentwicklung des Antriebsstrangs: Ingenieur:innen von maxon arbeiten gemeinsam mit dem Team an der Optimierung der Motoren. Zudem sammeln AMZ-Mitglieder regelmässig Praxiserfahrung im Rahmen von Praktika in der maxon Forschung & Entwicklung.

Näher zu den Kunden

Mexiko erhält eigene maxon Vertriebsgesellschaft

Seit dem 1. Januar 2026 operiert maxon in Mexiko als eigenständige Vertriebsgesellschaft. Bislang wurde der mexikanische Markt als Agentur der US-Niederlassung von maxon betreut. Mit diesem Schritt reagiert maxon auf die steigende Nachfrage in Mexiko. Ziel ist es, Kunden und Kundinnen in Mexiko künftig direkter und effizienter bedienen zu können. Der Sitz der Vertriebsgesellschaft befindet sich in Guadalajara, verantwortlich vor Ort ist Managing Director Marcial Gähwiler.



Ausgezeichnet!

Robotik-Award für maxon Antrieb IDX 70

Der integrierte Antrieb IDX 70 von maxon wurde in Boston (USA) mit einem RBR50 Robotics Award ausgezeichnet. Die Jury, die jeweils die 50 innovativsten Produkte des Jahres kürt, würdigte die Kombination aus hoher Leistungsdichte, integrierten Sicherheitsfunktionen und einfacher Systemintegration – Eigenschaften, die den Anforderungen moderner Robotikanwendungen entgegenkommen. Der IDX 70 wurde für mobile Roboter, autonome Fahrzeuge und kollaborative Roboter entwickelt. Dank seines hohen Drehmoment-Gewichts-Verhältnisses ermöglicht er kompaktere und leichtere Robotersysteme, ohne Kompromisse bei der Leistung einzugehen. Dies schafft neue Freiheiten für Entwicklerinnen und Entwickler, insbesondere dort, wo Bauraum und Gewicht entscheidende Faktoren sind. Ein weiteres zentrales Merkmal sind die integrierten Sicherheitsfunktionen Safe Torque Off (STO) und Safe Brake Control (SBC). Damit wird der IDX 70 von einem reinen Antrieb zu einem sicherheitszertifizierten Subsystem. Für Kunden vereinfacht dies die Integration in ihre Maschinen und unterstützt den sicheren Einsatz von Robotern in Produktionsumgebungen, Logistikzentren oder bei Anwendungen mit direkter Mensch-Roboter-Interaktion. Nachdem im vergangenen Jahr bereits der High Efficiency Joint ausgezeichnet wurde, bestätigt sich ein Trend: Gefragt sind nicht nur leistungsfähige Einzelkomponenten, sondern intelligente, integrierte Lösungen, die Entwicklungsaufwand reduzieren und die Markteinführung beschleunigen. Genau hier setzt auch der IDX 70 an, indem er Antrieb, Steuerung und Sicherheitsfunktionen in einer kompakten Einheit vereint.

Für maxon ist diese Auszeichnung ein weiterer Beleg dafür, dass die konsequente Ausrichtung auf integrierte Antriebssysteme den Bedürfnissen der Robotikbranche entspricht – und Kunden dabei hilft, leistungsfähigere, sicherere und effizientere Maschinen und Systeme zu entwickeln.

Raumfahrt

maxon baut Weltraumaktivitäten weiter aus

Mit dem Artemis-Mondprogramm der NASA und dem Aufstieg von New Space befindet sich die Raumfahrt derzeit im Wandel – und mit ihr die Anforderungen an kritische Systeme und Komponenten. Ab Artemis IV wird auch maxon erstmals Teil von Anwendungen für bemannte Raumfahrtmissionen sein.

«Unsere Antriebssysteme helfen seit Jahrzehnten dabei, Rover auf dem Mars zu bewegen. In Zukunft werden sie auch Teil von Anwendungen sein, die entscheidend zur Sicherheit von Astronautinnen und Astronauten beitragen», sagt Robin Phillips, Leiter des maxon SpaceLab.

Der Einstieg in Anwendungen für bemannte Raumfahrtmissionen baut auf der jahrzehntelangen Erfahrung von maxon mit hochzuverlässigen Antriebssystemen auf, unter anderem für Marsmissionen der NASA und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Gleichzeitig steigen die Anforderungen deutlich: Anwendungen für bemannte Missionen verlangen zusätzliche Redundanzen, strengere Validierungen und kompromisslose Zuverlässigkeit.

Organisatorische Anpassungen

Um dieses Wachstum und die zukünftigen Anforderungen zu unterstützen, hat maxon verschiedene organisatorische Anpassungen umgesetzt, unter anderem wurden im Engineering und in der Produktion die Strukturen angepasst. Parallel dazu wächst auch die Infrastruktur weiter: Die Space-Produktion expandiert am maxon Hauptsitz in der Schweiz in den Reinraum, den sich der Bereich künftig mit Medical teilt. Mit den Anpassungen schafft maxon die Voraussetzungen, um zukünftige Raumfahrtprojekte noch gezielter zu unterstützen und die eigenen Space-Aktivitäten langfristig auszubauen.



maxon Portfolio

Produkt-Katalog im neuen Kleid

Der Katalog 2026/2027 von maxon wurde vollständig neu konzipiert. Im Zuge einer gezielten Portfolio-Optimierung wurden Redundanzen minimiert und die Komplexität reduziert. Die überarbeitete Gliederung der Produktbereiche bietet nun übersichtliche Einführungsseiten, die einen schnellen Einstieg in jedes Portfoliosegment ermöglichen. Ergänzt wird dies durch einen neuen «Welcome»-Bereich, der maxon als Unternehmen positioniert und auf einen Blick vermittelt, wofür das Unternehmen steht.

Ein besonderer Fokus liegt neu auf den Market Solutions, die einen eigenen Bereich erhalten haben. Jede Business Unit

von maxon (Medical, Aerospace, Industrial Automation und Mobility) wird dort auf einer Doppelseite vorgestellt, wobei die jeweilige Expertise in den relevanten Teilmärkten deutlich hervorgehoben wird.

Zusätzlich werden die Bereiche Robotik, Space und Elektronik innerhalb der Market Solutions separat dargestellt. Damit zeigt maxon ihre breite Marktkompetenz und ermöglicht ein gezieltes Stöbern bei gleichzeitigem Überblick über die Kernmärkte. Auch der Abschnitt «Technik – kurz und bündig» wurde vollständig überarbeitet.



Der neue Katalog ist hier
als E-Paper verfügbar.

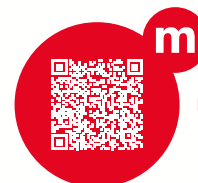
Zahl

500 kg



Wheel Drive

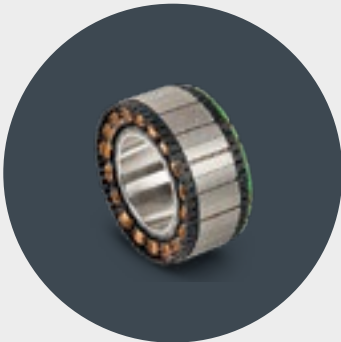
Eine halbe Tonne auf einen Antrieb? Kein Problem. Das maxon Wheel Drive bewegt Nutzlasten von bis zu **500 kg** pro Antrieb und liefert dabei die nötige Kombination aus Power, Dynamik und Zuverlässigkeit. Mit einer Leistung von bis zu **500 W** und einem **Nenn Drehmoment von 40 Newtonmeter** sorgt der Radantrieb für effizienten Vortrieb. Damit bietet das Wheel Drive eine kompakte und leistungsstarke Basis für fahrerlose Transportsysteme, mobile Roboter und andere autonome Fahrzeuge.



Mehr erfahren

Neue Produkte

Kompaktere Bauformen, neue Funktionen, integrierte Sicherheit und komplette Systeme für die Industrie: Vier aktuelle Portfolio-Neuzugänge im Überblick.



EC frameless DT 50 M

Für integrierte Antriebssysteme

Der EC frameless DT 50 M wurde für Anwendungen entwickelt, bei denen sich der Motor direkt in Kundensysteme integrieren lässt. Durch das getrennte Rotor- und Stator-Konzept kann der Antrieb flexibel in bestehende Konstruktionen eingebaut werden. Der bürstenlose Motor kombiniert hohe Effizienz mit dynamischem Drehmoment und kompakter Bauweise. Dadurch eignet er sich besonders für Robotik-, Industrie- oder Medizintechnikanwendungen, bei denen Bauraum und Gewicht eine wichtige Rolle spielen.

GSW 20

Kompaktes Wellgetriebe für präzise Bewegungen

Die Wellgetriebe-Serie GSW wurde seit ihrer Einführung kontinuierlich erweitert. Die Getriebe übertragen hohe Drehmomente präzise und effizient und lassen sich mit verschiedenen maxon Antrieben kombinieren. Mit dem GSW 20 ergänzt maxon die Serie um eine kompakte Variante für Anwendungen mit begrenztem Bauraum. In Kombination mit einem ECX PRIME Motor entsteht eine platzsparende Antriebseinheit für Robotik- und Automatisierungsaufgaben, bei denen Präzision und kompakte Integration gefragt sind.



IDX 70 Safe Control

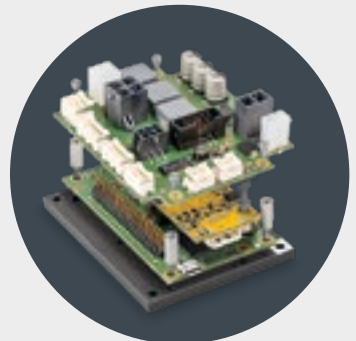
Industrieantrieb mit integrierter Sicherheit

Die Industrieantriebe der IDX-Serie sind als Plug-and-Play-Lösungen für industrielle Anwendungen und autonome Fahrzeuge ausgelegt. Mit dem IDX 70 Safe Control erweitert maxon die Serie nun um eine Variante mit integrierter funktionaler Sicherheit bis SIL3 / Performance Level e, Category 3. Der Antrieb kombiniert Motor, Getriebe, Encoder und Steuerung in einer kompakten Einheit. Dadurch reduziert sich der Integrationsaufwand für Maschinen- und Anlagenbauer, insbesondere bei Anwendungen in der Industrieautomation oder Intralogistik.

EPOS4 Compact STO und MiniMACS6

Sicherheit und Vernetzung

Auch bei Steuerungen gewinnt funktionale Sicherheit zunehmend an Bedeutung. maxon entwickelt seine Elektroniklösungen deshalb gezielt in diese Richtung weiter. Ein Beispiel dafür ist der EPOS4 Compact 60/20 STO mit Safe Torque Off. Ergänzt wird das Portfolio durch kompakte Steuerungen wie den ESCON2 Nano 24/2 und den ESCON2 Micro 60/5. Ebenfalls neu verfügbar ist der frei programmierbare Mehrachsen-Controller MiniMACS6 mit Profinet-Schnittstelle für vernetzte Automatisierungsanwendungen.



maxon Online Shop:
Hier finden Sie mehr als 6000 Produkte,
Selektionshilfen, Kombinationstools
und ausführliche Produktinformationen:
shop.maxongroup.ch



Der Motor als Sensor: Wie maxon MIND Condition Monitoring neu denkt

Predictive Maintenance beginnt im Antriebssystem: Mit maxon MIND (motion insights and diagnostics) hat maxon eine Lösung entwickelt, die den Motor zum intelligenten Sensor macht. Durch maschinelles Lernen, physikalisches Know-how und eine offene Systemarchitektur ermöglicht maxon MIND eine präzise Zustandsüberwachung – transparent, nachvollziehbar und bereit für den industriellen Einsatz.

Text: Claude Jaquemet

In der industriellen Antriebstechnik ist der Motor längst mehr als nur ein Aktuator. Er liefert wertvolle Informationen über den Zustand des gesamten Systems – vorausgesetzt, man weiss, wie man diese Daten richtig interpretiert. Genau hier setzt maxon mit ihrer neuen Lösung maxon MIND (motion insights and diagnostics) an. Das System nutzt die Signale des Motors, um Rückschlüsse auf den Zustand des Antriebssystems und dessen Umgebung zu ziehen. Den Ansatz bringt das zuständige Entwicklungs-Team bei maxon so auf den Punkt: «Der Motor ist der beste Sensor in der Maschine.»

maxon MIND wurde entwickelt, um Condition Monitoring und Predictive Maintenance auf ein neues Niveau zu heben. Die Lösung analysiert Daten, die während des Maschinenbetriebs aus dem Controller ausgelesen werden, und erkennt daraus Muster, die auf Verschleiss oder Fehlfunktionen hinweisen. Dabei geht es nicht nur um die Überwachung des Motors selbst, sondern um das gesamte Antriebssystem und der damit verbundenen Mechanik. So lassen sich Abweichungen frühzeitig erkennen.

Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig. maxon MIND ist besonders gefragt in Anwendungen, bei denen unerwartete Ausfälle frühzeitig erkannt werden müssen – etwa zur Er-



höhung der Personensicherheit oder zur Minimierung von Downtime. Dabei erkennt maxon MIND auch Probleme, die in klassischen Tests verborgen bleiben. Auch in Produktionslinien mit mehreren Maschinen in Reihe kann maxon MIND helfen, kleinste Abweichungen zu identifizieren, bevor sie sich auf nachgelagerte

Prozesse auswirken. Darüber hinaus bietet das System einen Mehrwert im Serviceeinsatz bei Anwendungen, bei denen der tatsächliche Gerätezustand für die Wartungsplanung entscheidend ist.

Erklärbare, optimierte KI: wenig Daten, hohe Nachvollziehbarkeit

Technologisch basiert maxon MIND auf erklärbarer, Künstlicher Intelligenz. Damit ist sichergestellt, dass jegliche Diagnosen und Voraussagen nachvollziehbar sind. Das ist insbesondere in sicherheitskritischen und stark regulierten Anwendungen essenziell. Das von maxon entwickelte Machine-Learning-Modell kommt zudem mit wenig Daten aus und kann auf einfacher Hardware betrieben werden. Der Vorteil: Minimalinvasive Integration in der Anwendung und geringer (Zeit-)Aufwand für das Modelltraining. Zudem benötigt das Modell keine GPU-Infrastruktur, was insbesondere ein

Kostenvorteil für Neuentwicklungen ist. Auch Retrofits in Bestandsanwendungen sind möglich.

Die Datenverarbeitung folgt einem klar strukturierten Ablauf. Zuerst werden die Rohdaten während des Maschinenbetriebs erfasst. Diese werden vorverarbeitet, bevor sie in das Machine-Learning-Modell gelangen. Dort prüft das Modell die Daten und analysiert genauestens jede Abweichung von einem gesunden Betriebszustand. Das Ergebnis steht dem Kunden anschliessend via Application Programming Interface (API) zur Verfügung. Glassbox statt Blackbox: Jeder Verarbeitungsschritt ist rückverfolgbar.

System lernt aus der realen Anwendung

Ein wesentliches Merkmal von maxon MIND ist die Integration von domänenspezifischem Know-how in das Modell. Die physikalischen Zusammenhänge eines mechatronischen Systems fliessen direkt in die Modellierung ein. Dadurch wird eine hohe Prognosequalität bei gleichzeitig geringem Datenbedarf erreicht. Das System lernt zudem aus der realen Anwendung: Bei der Inbetriebnahme der Maschine wird ein Initialzustand erfasst, der den Motor im Kontext seiner Umgebung beschreibt. Im laufenden Betrieb werden dann regelmässig neue Daten eingespeist, die mit dem Modell abgeglichen werden. Je nach Anwendung geschieht dies stündlich, täglich oder einfach nach Bedarf.

Die Qualität der Daten spielt dabei eine zentrale Rolle. Um valide Ergebnisse zu erzielen, müssen die aufgenommenen Signale eine ausreichende Repräsentativität für den Betriebszustand der Maschine aufweisen. Deshalb arbeitet maxon eng mit den Kunden zusammen, um geeignete Messzyklen zu definieren. Diese können beispielsweise standardisierte Bewegungsabläufe umfassen, die typische Belastungssituationen abbilden. Auf diese Weise entsteht ein auf die Kundenanwendung abgestimmtes und robustes Modell, das auch unter variierenden Bedingungen zuverlässige Aussagen trifft.

Eine offene Plattform

Eine wichtige Rolle bei maxon MIND spielt auch der Umgang mit Daten. Standardmässig erfolgt die Datenverarbeitung in der Cloud. Kunden können ihre Daten einsehen und herunterladen. Es werden keine personenbezogenen Informationen benötigt, alle Daten können vom Kunden anonymisiert werden (Ausnahmen: Artikel- und Seriennummer des Antriebs).

Die Plattform ist offen konzipiert. Kunden können über eine API auf ihre Daten zugreifen und diese in ihre Systemumgebung integrieren. Die Lösung ist minimalinvasiv: Bestehende Motoren, Elektronik und Steuerungen bleiben unverändert. Einzige Voraussetzung ist die Installation eines Softwarepakets auf dem Mastercontroller, das die Daten beispielsweise via Message Queuing Telemetry Transport Protokoll (MQTT) überträgt. Ist die Maschine bereits ans Internet angebunden und verfügt der Controller über die Fähigkeit zur Datenakquise, kann das System innerhalb weniger Tage in Betrieb genommen werden. Alle nötigen Spezifikationen sind bereits definiert.

Voraussetzungen und Kompatibilität

Ein Vorteil von maxon MIND liegt in seiner hohen Kompatibilität mit bestehenden Systemen. Die Lösung ist so konzipiert, dass sie sich nahtlos in unterschiedliche Antriebskonfigurationen integrieren lässt – unabhängig von Branche oder Anwendung. Bestehende Hardware wie Motoren, Steuerungen und Elektronik muss nicht ersetzt werden. Auch ist maxon MIND grundsätzlich im gesamten maxon Antriebs-Portfolio einsetzbar, sofern der entsprechende Motor mit einer Steuerung ausgestattet ist.

Technischer Fokus, industrielle Robustheit, offene Architektur

Im Marktumfeld positioniert sich maxon MIND als hochspezialisierte Lösung für anspruchsvolle Anwendungen. maxon verfolgt einen fokussierten Ansatz, der die physikalischen Eigenschaften des Antriebssystems in der Tiefe analysiert. Diese Kombination aus technischem Fokus, industrieller Robustheit und offener Architektur macht maxon MIND zu einer Lösung, die nicht nur Daten sammelt, sondern echten Erkenntnisgewinn liefert.

Mit maxon MIND bringt maxon eine durchdachte, technisch fundierte Lösung auf den Markt, die den Motor zum intelligenten Sensor macht. Die Kombination aus maschinellem Lernen, physikalischem Know-how und offener Systemarchitektur macht das System zu einem zukunftsfähigen Werkzeug für industrielle Anwendungen. Der Motor wird damit nicht nur zum Antrieb, sondern zum zentralen Element der Zustandsüberwachung – und damit zum Schlüssel für mehr Effizienz, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Industrie 4.0. 



Zur Person

Claude Jaquemet ist Business Development Manager Digital Business bei maxon. Er ist seit zehn Jahren für die maxon Gruppe tätig. Auch im Bereich der Antriebstechnik wird die nahtlose Einbindung in die digitale Welt zunehmend zum entscheidenden Erfolgsfaktor. Gemeinsam mit seinem Team entwickelt Claude Jaquemet darum Kundenlösungen in diesem Bereich.

Aufbruch!

Sie begegnen uns in Spitälern, Lagern, Laboren und Pflegeeinrichtungen, reisen für uns ins All – und jedes Jahr werden es mehr: Roboter sind längst überall. Wie vielfältig, spezialisiert und überraschend die Robotik heute schon ist, zeigt unsere kleine Auswahl.

Text: Sven Gallinelli



Weltraum

Bei der Erkundung fremder Planeten kommen Roboter zum Einsatz, etwa der NASA-Mars-Rover Perseverance. In Weltraumstationen unterstützen Anlagen wie Roboterarme die Astronauten. In Satellitensystemen sorgen sie für Manipulationsfähigkeit; bei einer Landemission auf dem Mond könnten auch vierbeinige Roboter eine Rolle spielen.

Hier steckt
maxon drin!



Logistik

Die moderne Logistik wäre ohne Robotertechnologie nicht denkbar. In Lagerhäusern sorgen autonome Transportroboter dafür, dass Güter verschoben werden können. Roboterarme sortieren Waren. Zudem muss jedes Robotikvehikel sich auch mit allen anderen Systemen abgleichen und koordinieren – aber auch mit den Menschen in dieser Umgebung.



Pflege

Pflegroboter können dort einspringen, wo manchmal die Zeit fehlt – indem sie Patienten Sicherheit vermitteln. Therapieroboter können Komfort geben und Stress reduzieren und dafür sorgen, dass die Patienten ihre sozialen Aktivitäten verbessern können.

Industrie

In der Industrie kennt man Roboter schon länger. Vor allem, wenn es darum geht, einen Arbeitsablauf wiederholt genau auszuführen. Die nächste Generation von Industrierobotern kann aber mehr: Dank Physical AI werden sie intelligent, können Einschätzungen dank ausgeklügelter Sensorik selber vornehmen und autonom reagieren.



Haushalt

Ungeliebte Haushaltspflichten werden von Robotern übernommen. Der Staubsauger-Roboter gehört hier zu den bekanntesten; aber es gibt auch Fensterputz-Roboter, Wischmob-Roboter oder Sicherheitsroboter. Was Roboter aber derzeit nicht können (auch in naher Zukunft nicht), ist, den Geschirrspüler auszuräumen – denn dafür fehlt ihnen die Taktilität.



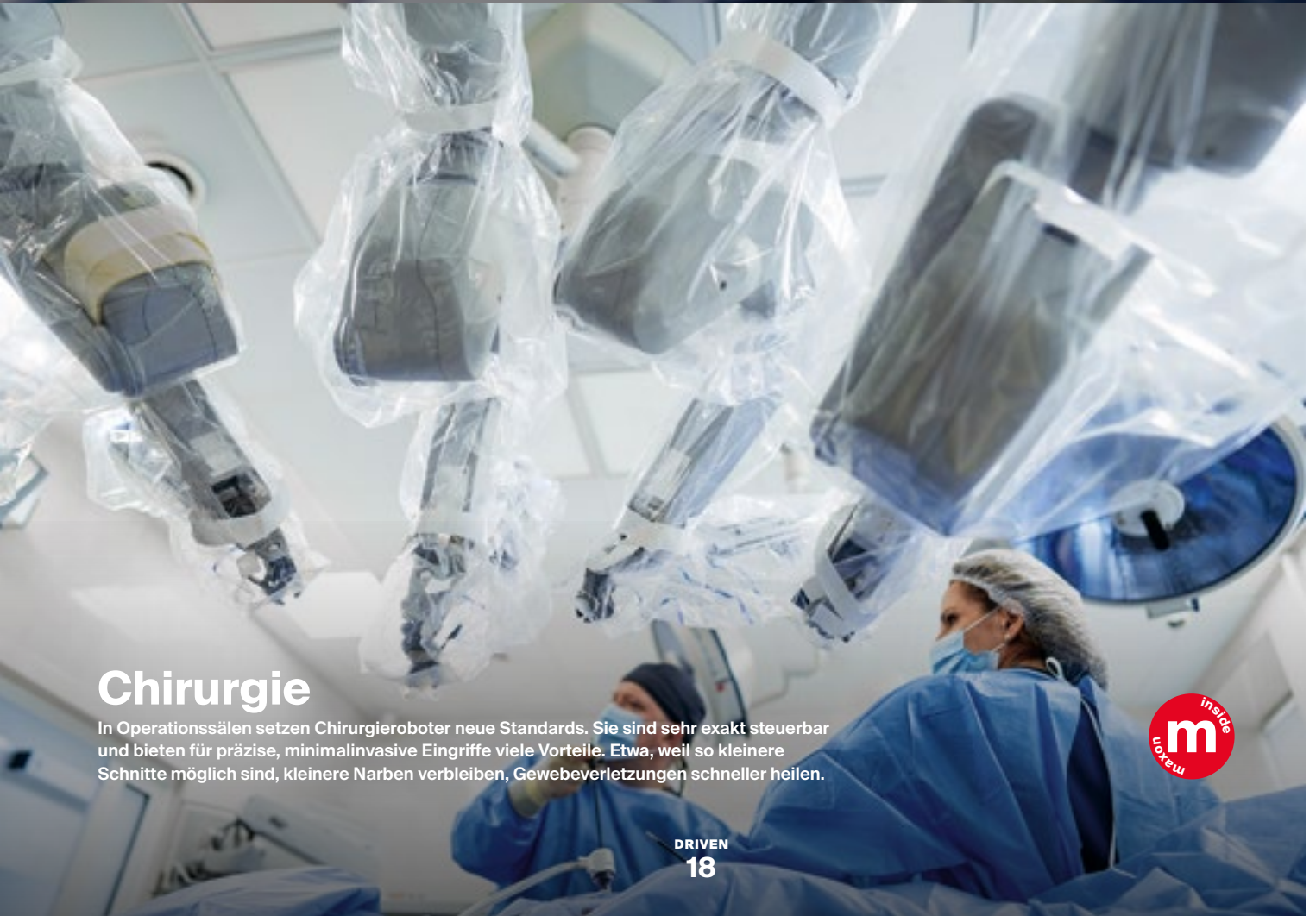
Humanoide Roboter

Bislang waren humanoide Roboter oft eine Spielerei. Mit Künstlicher Intelligenz können sie nun aber zu denkenden Systemen werden und sich auch in unstrukturierten Umgebungen frei bewegen. So übernehmen sie in der Industrie autonom auch komplexere Aufgaben – oder arbeiten Hand in Hand mit dem Menschen.



Laborautomation

In der Labortechnologie geht es um Genauigkeit, Durchsatz und Zuverlässigkeit. Roboter stellen sicher, dass Laborproben zuverlässig geöffnet, verarbeitet und verschoben werden können.



Chirurgie

In Operationssälen setzen Chirurgieroboter neue Standards. Sie sind sehr exakt steuerbar und bieten für präzise, minimalinvasive Eingriffe viele Vorteile. Etwa, weil so kleinere Schnitte möglich sind, kleinere Narben verbleiben, Gewebeverletzungen schneller heilen.





Quadruped-Roboter

Roboter mit vier Beinen eignen sich hervorragend etwa im Bereich von Inspektionen. So können sie autonom Industrieanlagen überprüfen oder Aufgaben in unwirtlichen oder gefährlichen Umgebungen vornehmen. Quadrupeds kommen auch als Logistikroboter zum Einsatz. KI-Integration sorgt dafür, dass diese Roboter smart werden.



Mobilität

Autos verfügen heute über moderne Assistenztechnologien, zum Beispiel Spurhaltesysteme. Dadurch werden sie zu Robotern, die sich in teilstrukturierten Umgebungen bewegen können.

Wie unsere Kinder Roboter sehen

Neben Superhelden, Puppen oder Autos gehören sie zu den Klassikern unter den Spielzeugen: Roboter. Fast jedes Kind hat sofort ein Bild im Kopf, wenn es an sie denkt. Eine Studie zeigt nun: Die Art, wie sich Kinder Roboter vorstellen, kann Hinweise darauf geben, was sie Robotern in Zukunft zutrauen und wie sie zu ihnen stehen.

Text: Sven Gallinelli / Katharina Rilling

Ein Team der Pädagogischen Hochschule Tessin stellte rund 100 Schulkindern die Aufgabe: «Wie stellst du dir einen Roboter vor? Zeichne ihn!» Die Zeichnungen liessen sich grob in drei Kategorien einteilen. Einige Roboter waren kantig und humanoid gestaltet. Andere waren ebenfalls humanoid, zeichneten sich jedoch durch rundere und weichere Formen aus. Eine dritte Kategorie umfasste Roboter ohne menschliche Merkmale, etwa Roboterarme, Staubsaugerroboter oder Rover. Spannend: Kinder, deren Darstellungen stärker fiktional geprägt waren, trauten Robotern eher zu, eines Tages die Arbeit ihrer Eltern zu übernehmen. Kinder mit realistischeren Robotervorstellungen waren skeptischer. Diese Ergebnisse sind mit Vorsicht zu lesen, liefern aber Hinweise dafür, wie Bildungsroboter und Lernangebote gestaltet werden können – damit Kinder nicht nur mit Robotern lernen möchten, sondern auch besser verstehen, was Roboter sind und was sie können. ■

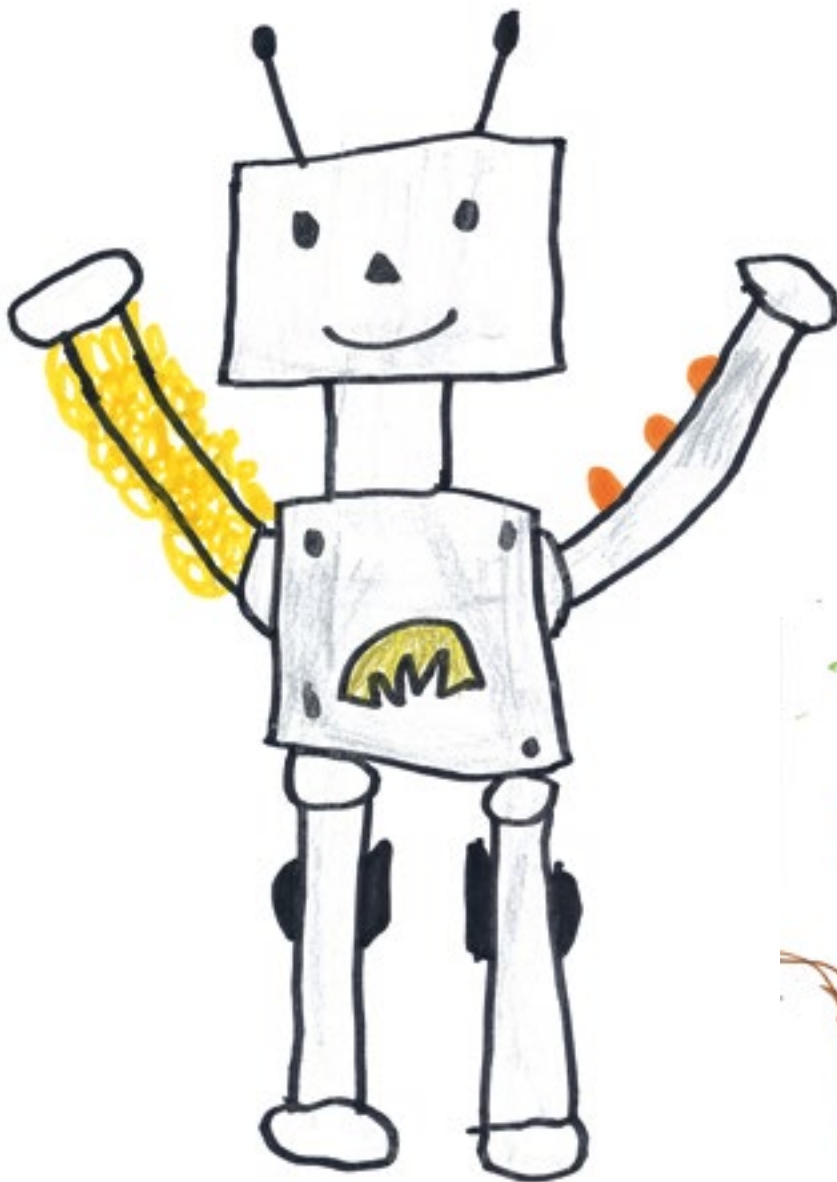


Tiara, 4 ½ Jahre



Zur Studie

Wir wollten wissen: Wie stellen sich die Kinder der maxon Mitarbeitenden Roboter vor? Sehen Sie selbst!



Eyla, 6 Jahre

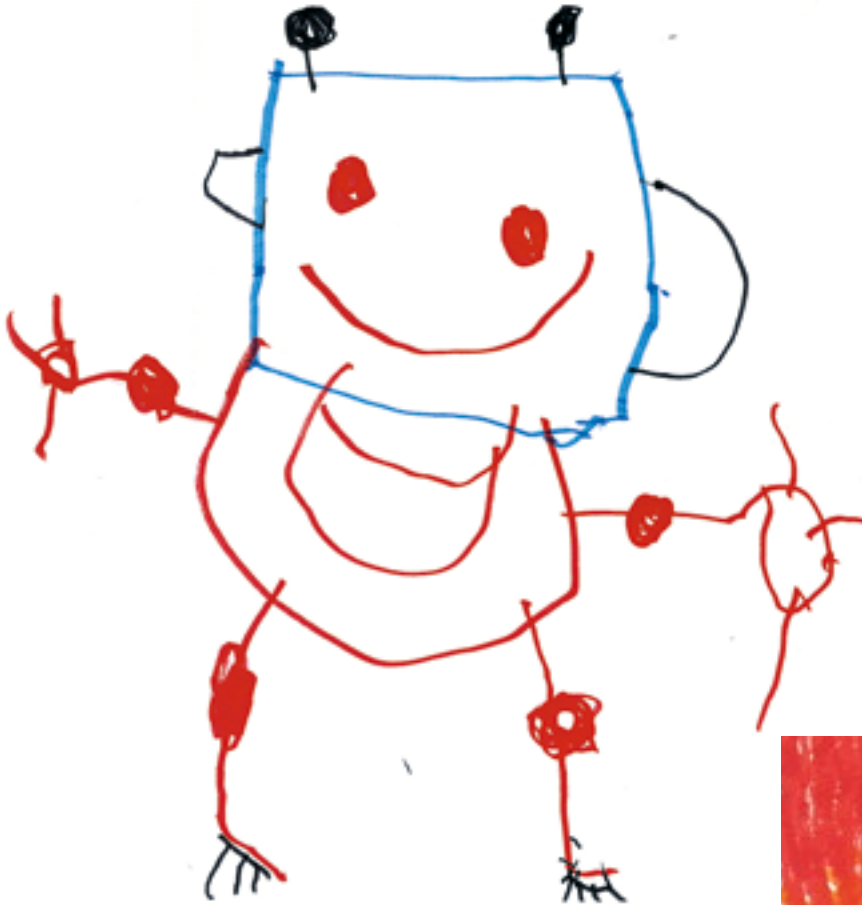


Bryan 5 Jahre



Iman, 2 ½ Jahre





Marlo, 4 ½ Jahre



Aren, 3 ½ Jahre

Pionierarbeit für Familien

Schon seit 1972 gibt es am Hauptsitz der maxon Gruppe in der Schweiz eine eigene Kindertagesstätte. Was heute selbstverständlich wirken mag, war damals eine echte Pionierleistung: Nur wenige Unternehmen investierten zu jener Zeit in eine betriebseigene Kita. maxon setzte damit früh ein Zeichen für Familienfreundlichkeit und für die bessere Vereinbarkeit von Beruf und Familie. Dieses Engagement lebt bis heute weiter: 24 Kinder finden in der Kita Platz und werden von Regula Bühler und ihrem zehnköpfigen Team liebevoll betreut, darunter auch drei Lernende. Regula Bühler kennt die Kita wie kaum eine andere: Vor 35 Jahren begann sie hier als Praktikantin, heute leitet sie die Einrichtung.



Enor, 4 Jahre



Afan, 5 Jahre



Hana, 4 Jahre

«Die Chips-Packung ist für einen Roboter ein schwieriges Problem»

Bei ANYbotics half er mit, einen der fortschrittlichsten Laufroboter der Welt zu entwickeln. Heute sorgt Mario Mauerer bei maxon dafür, dass sich Roboter überhaupt bewegen können. Der Leiter Business Development Robotik erklärt im Interview, warum der Humanoid-Hype mehr Substanz hat als sein Ruf, in welche Richtung sich die Robotik entwickelt – und wo derzeit die Grenzen der Technologie liegen.

Interview: Sven Gallinelli Foto: Lucas Ziegler



Was ist der Megatrend in der Robotik?

Der Bau der Robotik-Hardware ist in den letzten zehn Jahren viel einfacher geworden. Auch durch die Entstehung eines riesigen Ökosystems an Zulieferern, Batterieanbietern, Motoren, Computern und Sensoren. Getrieben wurde diese Entwicklung vom Smartphone-Boom, der dazu geführt hat, dass Rechenleistung, aber auch Kameras und 3D-Sensorik in kompakten Formfaktoren verfügbar waren. Das sind alles Bausteine, die man für den Bau eines guten, modernen Roboters benötigt, der autonom reagieren soll.

Und dann kam noch die Künstliche Intelligenz dazu ...

Das ist der zweite grosse Trend. Noch vor der Chatbot-Ära hat man etwa an der ETH relativ früh zu diesem Thema geforscht. Damals ging es darum, wie man maschinelles Lernen für die Regelung von Robotern einsetzen kann. Das maschinelle Lernen war sehr wichtig, und da war der Anstieg der verfügbaren Rechenleistung ein wichtiger Treiber. Heute können mit moderner Künstlicher Intelligenz grosse Datenmengen schnell verarbeitet und interpretiert werden; also Videosignale, Bewegungssignale, Sensordaten – all das, was ein moderner Roboter schnell auswerten muss, um zu funktionieren.

Warum ist das so wichtig?

Je mehr und je schneller diese Daten verarbeitet werden, desto eher kann ein Roboter autonom reagieren, weil er den Kontext seiner Aktionen versteht: wo er hingehen, welche Arbeiten er ausführen, welche Teile er zusammenschrauben soll. Das Thema braucht zwar nach wie vor noch viel Forschung, aber dieser grosse Trend hat einiges an Begeisterung in der Robotik ausgelöst.

Was genau macht die Faszination aus?

Mit dem Einzug der KI realisiert man, dass die Robotik in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren nochmals einen entscheidenden Sprung machen wird. Roboter werden unser tägliches Leben mehr und mehr beeinflussen, und wir werden ihnen damit häufiger begegnen – weil sie dann sicher und autonom um Menschen herum agieren können. Basierend auf guter,





Blick in die Fertigung von maxon: Hier entstehen auch die Robotik-Antriebe.

robuster Hardware und Rechenleistung. Und auf Softwaresystemen, die mit diesen Daten und Komplexitäten umgehen können.

In der fiktionalen Welt können Roboter schon alles: Menschen ersetzen, sich problemlos bewegen, auch schwierige Abläufe meistern. In der Realität ist das Bild durchzogener. Kommen wir den Robotern aus Hollywood langsam näher?

Das wird noch ein paar Jahre dauern. Zunächst werden Roboter in kontrollierten Umgebungen bei industriellen Anwendungen mehr und mehr Aufgaben übernehmen, vorerst in definierten Settings. Ein Roboter trägt derzeit zum Beispiel eine Kiste von A nach B. Das ist simpel. Aber man sieht bereits Möglichkeiten, wie das in vielseitigere Anwendungen ausgeweitet werden kann.

Der Running Gag in der Robotik ist, dass Roboter selbst simple Vorgänge nicht bewältigen können – etwa das Ausräumen des Geschirrspülers.

Ja, aber auch wenn es lustig klingt: Wenn Roboter fähig sind, den Geschirrspüler zu leeren, das Bett zu machen oder mit dem Staubsauger durch die Wohnung zu laufen, und zwar komplett autonom, dann ist dies das Ende der technologischen Reise. Klar, zum Teil können Roboter diese Aufgaben schon übernehmen, aber das sind meist nur Proof of Concepts, und dies funktioniert bisher nur in begrenztem Rahmen. Immerhin: Der Beweis, dass das grundsätzlich gelingen kann, ist somit erbracht. Nur dauert es noch ein paar Jahre, bis solche Aufgaben zuverlässig, sicher und effizient ausgeführt werden können.

Früher waren Robotiksysteme relativ einfach: Es wurde ein Ablauf einprogrammiert, und der wurde dann zigfach abgespielt. Heute sind diese Systeme komplexer. Worin besteht diese Komplexität genau?

Der Unterschied zu klassischen Industrierobotern ist die Modalität zwischen Sensorik, Interfaces und Berührungspunkten, die ein Roboter mit der realen Welt hat. Ein moderner Roboter ist auf gute Sensorik angewiesen, um seine Umgebung dynamisch zu erkennen. Die Umgebung kann

Foto: Jeremias Wieland, maxon

sich jederzeit ändern, was heisst, dass der Roboter diese immer wieder neu aufnehmen, einlesen und richtig darauf reagieren muss. Die moderne Robotik ist also viel multimodaler als früher.

Nehmen wir als Beispiel Logistik...

Wenn wir online shoppen, werden uns die Waren aus einem Lagerhaus zugestellt. Diese Lagerhäuser sind inzwischen hochkomplexe Anlagen, in denen Roboter vielfältige Aufgaben übernehmen. Es gibt zum Beispiel autonome Transportfahrzeuge, die Kisten verschieben. Oft tun sie das auf einem vorgegebenen Pfad, in einer kontrollierten Umgebung. Der Trend geht aber dahin, dass diese Roboter auch in unkontrollierten Umgebungen unterwegs sind – oder anders gesagt auch da, wo sich Menschen bewegen. In der Logistik zeigen sich aber auch die Grenzen der Robotik auf. Nehmen wir an, ein Roboter muss eine Chips-Packung aus einer Kiste fischen – es wird für ihn ein Problem sein, diese Packung nicht zu beschädigen.

Gibt es Anwendungen, in denen Multimodalität inzwischen schon gut funktioniert?

Ja, zum Beispiel eine, die wir alle kennen: das Auto. Moderne Autos bestehen aus einer Vielzahl von Systemen: einem Motor, einem Kamerasystem für den Spurhalteassistenten, Radarsensoren für den Abstandstempomaten, mehrere Computer, die das Auto managen und auf diese Sensoren reagieren. Der nächste Schritt sind komplett autonom fahrende Autos, die selbstständig belastbare Entscheidungen treffen müssen.

Was genau ist eigentlich ein Roboter? Ist das nicht fast jedes technische System?

Spannende Frage! Ist das Flugzeug ein Roboter? Ist der Geschirrspüler ein Roboter? Eigentlich ist der Industrieroboter ja auch

kein Roboter, sondern eher eine gesteuerte Maschine, oder? Ist ein Roboter eine Maschine, die auf eine unstrukturierte Umgebung reagieren kann? Vielleicht. Aber das kann der Autopilot in einem Flugzeug ja auch. Unter Ingenieur:innen sagt man: Wenn man einen Roboter sieht, dann weiss man, ob es sich um einen Roboter handelt oder nicht. (Lacht.) Ich würde es so definieren: Wenn ein verkörpertes System autonom handelt und physisch mit seiner Umgebung interagieren kann, ohne dass es gesteuert werden muss, dann kann man es als Roboter bezeichnen.

Wäre das Auto gemäss dieser Definition mit modernen Assistenzsystemen ein Roboter?

Das Auto ist wohl ein Grenzfall. Der Spurhalteassistent ist eigentlich ein Roboter. Er interpretiert Signale seiner Umgebung und reagiert darauf. Andererseits braucht er die Linien auf der Strasse, damit er funktionieren kann. Damit reagiert er nur auf eine halbstrukturierte Umgebung. Wenn ein Kind auf die Strasse rennt und das Fahrzeug bremst, hat das wiederum Robotercharakter. Ein selbstfahrendes Auto wäre somit klar ein Roboter. Was beim Auto wohl fehlt, ist die physische Interaktion mit der Umgebung. Worauf wir uns aber ganz sicher einigen können: Ein Geschirrspüler ist kein Roboter. (Lacht.)

Beim Auto hat es einige Zeit gedauert, bis der heutige Stand der Technologie erreicht war. Wie sieht der zeitliche Rahmen in der Robotik aus?

Die Menschheit hatte etwa 100 Jahre Zeit, das Auto bis zum heutigen Niveau zu entwickeln. In der Robotik werden wir dafür nicht so lange brauchen. Wenn man davon ausgeht, dass die moderne Robotik in den 1990er-Jahren ihren Anfang nahm, dann werden es wohl maximal 40 Jahre sein, bis die Technologie ausgereift ist. Ein Roboter ist viel kompakter als ein Auto, aber er hat eine ähnliche Komplexität und verfügt über sehr ähnliche Systeme. Der begrenzte Platz macht die Integration der Komponenten allerdings anspruchsvoller. Das ist die grosse Herausforderung für die Ingenieure und macht die Robotik primär zu einer Systementwicklungsaufgabe.

«Wenn man einen Roboter sieht, dann weiss man, ob es sich um einen Roboter handelt oder nicht.»

Könnte man sagen: Mechanisch gesehen sind die Roboter erfunden, aber die Kombination der Mechanik mit allen digitalen Systemen und der Software ist nun die Herausforderung?

Ja. Die Mechanik, die Roboter antreibt, das sind Systeme, die sehr gut bekannt und beherrscht sind. Elektromotoren, Getriebe, Maschinenbau und Elektronik gibt es schon lange. Grössere Veränderungen in der Mechanik wird es höchstens geben, wenn es in der Materialwissenschaft zu Fortschritten kommt, die dann vielleicht dazu führen, dass man Flussdichte oder Füllfaktoren in Elektromotoren noch effizienter ausnutzen kann und so die Performance steigt. Viel wichtiger sind aber die Systemarchitektur und das Zusammenspiel von Hardware mit der Software. Es gibt den Spruch: «Software eats hardware». Der gilt in der Robotik nur, wenn man die Hardware und ihre Verhaltensweisen wirklich gut kennt. Dann kann man gewisse Komplexitäten in die Software verlagern, ohne dass es zu negativen Effekten kommt.

Wenn man mit Menschen über Robotik spricht, dann haben sie sofort ein Bild im Kopf: das eines Humanoiden. Diese werden für kleinste Erfolge gefeiert, zum Beispiel wenn sie eine Treppe meistern. Gleichzeitig ist es aber auch die Art von Robotern, die am wenigsten kommerzialisiert ist – weil offenbar der Anwendungszweck fehlt. Sind die Humanoiden mehr Schein als Sein?

Die Faszination für Humanoide kommt aus der Populärkultur. Schon in den 1940er-Jahren gab es erste Filme, die mit diesem Sujet gespielt haben. Der Siegeszug ging dann weiter, über «Star Wars» und «Terminator» Filme, wo sich Humanoide ganz normal bewegen. Im richtigen Leben ist das wie gesagt anspruchsvoller. Für die breite Masse war die Technologie bislang nicht bereit. Der Hype um Humanoide ist aber an sich

«Wenn Roboter fähig sind, Geschirr auszuräumen, ist dies das Ende der technologischen Reise.»



nichts Schlechtes, da das Thema durch ihn Aufmerksamkeit bekommt: Robotikfirmen erhalten Geld für ihre Entwicklungen; das schafft Kompetenzen und ermöglicht, dass man Humanoide bauen, skalieren und massentauglich machen kann.

Auch humanoide Roboter profitieren von den Entwicklungen der Künstlichen Intelligenz. Man spricht von «Physical AI», also KI, die mit mechanischen Systemen zusammenarbeitet. Wie weit ist die Entwicklung der Physical AI fortgeschritten?

Dieser Bereich steckt in den Anfängen und benötigt noch viel Forschungsarbeit. Für ein passives System, das eine Aufgabe ausführt, aber noch nicht mit der Umgebung reagieren muss, ist Physical AI derzeit nicht schlecht. In der industriellen Inspektion etwa funktioniert das schon halbwegs robust: Roboter können sich bewegen, reagieren passiv auf die Umgebung, erkennen, ob es irgendwo ein Problem gibt.

Überall, wo Roboter und Menschen Hand in Hand arbeiten, muss vor allem die Sicherheit gewährleistet sein. Aber Robustheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit bleiben derzeit ein grosses Thema, insbesondere bei Systemen, die Manipulationen vornehmen, etwa Türen öffnen, Objekte transportieren, ein Tablett an den Tisch bringen und ja, auch den Geschirrspüler ausräumen. Physical AI kann aber entscheidend dazu beitragen, dass man in diesen Themen Fortschritte erzielt.

KI mit Sprachmodellen neigen ja zum Halluzinieren. Wie ist das bei einer Physical AI? Hat sie auch die Tendenz, Situationen komplett falsch einzuschätzen?

Ja, das wird es geben und wird wohl ein funktionaler Nachteil dieser Technologie sein: dass sie zwar viel kann, aber manchmal unvorhergesehen agiert. Das kann je nach Einsatzgebiet weitreichende Folgen haben. Bei den Sprachmodellen wurden die Halluzinationen in den letzten Jahren merklich redu-

ziert; bei Physical AI wird noch viel Forschung nötig sein, um diese Risiken in den Griff zu bekommen.

Ein anderes Problem ist die Regulierung: Es gibt derzeit keine Standards, welche Bedingungen oder Normen eine Physical AI einhalten muss oder wie sich ein Roboter in einer unstrukturierten Umgebung zu verhalten hat.

Die Regulierung hinkt klar nach. Die EU probiert da zum Teil mit ihrem AI Act, das Thema zeitig anzugehen. Andererseits gibt es aber auch ein Interesse daran, die Entwicklung nicht zu früh zurückzubinden. Wer Robotiktechnologie früh beherrscht, hat einen Vorteil gegenüber anderen Ländern. Um die Technologien skalieren zu können, werden aber Regularien notwendig sein, allein schon, um die Sicherheit der Technologie zu gewährleisten. ■



HIGH EFFICIENCY JOINT - HIGHLIGHT DER TECHNIK

Mario, maxon sorgt dafür, dass sich Roboter bewegen können. Zusammen mit verschiedenen Teams bei maxon entwickelst du unsere Robotik-Aktuatorlösungen. Wie wichtig ist die Aktuatorik für ein Robotersystem?

Dass sich ein Roboter bewegt, ist das zentrale Element. Ohne Bewegung kann er keinen Wert schaffen. Bewegung braucht Drehmoment und Kraft. Diese Kraft wird durch elektromagnetische Aktuatoren generiert, entweder rotativ oder linear.

Foto: maxon

Unsere Kernkompetenz liegt darin, elektromagnetische Kraft und Drehmoment gezielt in unterschiedliche Bewegungsformen umzuwandeln und damit die passende Bewegung am richtigen Ort bereitzustellen.

Eines unserer Highlight-Produkte für die Robotik ist der High Efficiency Joint (HEJ). Was ist der Gedanke hinter diesem integrierten Aktuator?

Unser High Efficiency Joint ist eine Plattform von sehr hoch integrierten, modernen Antriebssystemen für die Robotik. Der Integrationsgrad ist sehr wichtig: Es sind Motor, Getriebe und Steuerelemente, die gut aufeinander abgestimmt sind und wo sehr viele Features durch die Firmware, die direkt auf dem Aktuator läuft, bereitgestellt werden. Unsere Kunden können dieses System darum auf eine einfache Art und Weise in ihre Robotikanwendung integrieren. Weil viele Features durch die Software bereitgestellt werden, ist die mechanische Komplexität relativ gering.

Dies bedeutet, dass die Software Aufgaben übernimmt, die früher bei der Mechanik lagen?

Genau. Die geringere Komplexität bei der Mechanik bedeutet aber nicht, dass der Joint ein simples Produkt ist. Denn um die Komplexität der Hardware zu reduzieren, braucht es viel Engineering und Testing. Man muss sicherstellen, dass die richtige Performance mit den richtigen Features kombiniert wird, die von Robotikern auch nachgefragt werden. Mit unseren High Efficiency Joints haben wir hier eine gute Balance gefunden. Nicht nur technologisch: Denn das System ist gut skalierbar und auch von den Kosten her für die Kunden attraktiv.

Der High Efficiency Joint basiert auf einer gemeinsamen Entwicklung mit dem Zürcher Robotik-Start-up ANYbotics, das sogenannte Quadruped-Roboter herstellt. Du selbst hast früher bei ANYbotics gearbeitet. Die Entwicklung des Joints brauchte mehrere Jahre. Weshalb war das so aufwendig?

Werfen wir einen Blick in die Geschichte der Antriebe in der Robotik: Früher hat man einen Antrieb gebraucht, der relativ

«Das System ist gut skalierbar und von den Kosten her für die Kunden attraktiv.»

genau und präzise das Ausgangsmoment messen konnte. Das hat man damals mit einem sogenannten Series-Elastic Actuator getan. Der hatte eine Feder im Antrieb, und mit dieser Feder konnte man das Ausgangsmoment relativ gut messen. Damals hat man das gebraucht, weil die Robotikregler modellbasiert waren. Damit hat man dann etwa an der ETH viel herumexperimentiert und auch ANYmal-Roboter gebaut, die mit solchen Aktuatoren funktionierten. Leider nicht zuverlässig: Die Regler mussten sehr genau eingestellt werden, waren dadurch aber nicht besonders flexibel.

Mit anderen Worten: Das war ein rein mechanisches System und im Alltag zu starr.

Genau. Und dann kam der Paradigmenwechsel etwa 2019, wo plötzlich maschinelles Lernen möglich war. Das hat dazu geführt, dass der Regler auf dem Roboter viel robuster agieren konnte. Da kamen erste neuronale Netze zum Einsatz. Die waren relativ einfach, noch weit entfernt von Künstlicher Intelligenz. Aber die Netze konnten in Simulationen trainiert werden; so konnte man über Nacht plötzlich in sehr viel komplexeren Umgebungen klar kommen. Die Aktuatoren wiederum mussten nicht mehr mechanisch genau funktionieren, was dazu führte, dass die Mechanik einfacher ausgelegt werden konnte; es brauchte keine Federn mehr, es reichte eine einfachere Motor-Getriebe-Kombination. Die konnte das Drehmoment zwar nur halbwegs präzise einstellen, was aber für den Anwendungszweck ausreichend war. Das nennt man einen Quasi-Direct Drive.

Ihr hattet also eine neue Ausgangslage für die Aktuatortechnologie in den Robotern. Welche Folgen hatte dies?

Dass wir die bisher entwickelten Aktuatoren für die ANYmal-Roboter nicht mehr verwenden konnten. Entsprechend mussten wir wieder von vorne anfangen und ein System

entwickeln, das auf die neue technologische Situation abgestimmt war. Daraus sind dann die heutigen High Efficiency Joints entstanden, in denen Mechanik und Software integriert und aufeinander abgestimmt sind.

Für viele Robotikanwendungen muss der mechanische Teil des Antriebs gar nicht mehr so präzise sein, weil das softwareseitig aufgefangen werden kann?

Ja, für einen Roboter, der in unstrukturierten Umgebungen unterwegs ist, wo die Genauigkeit seiner 3D-Sensoren irgendwo im Zentimeter- bis Millimeterbereich ist, braucht man keinen sehr präzisen Antrieb. Da reden wir jetzt aber nur von den mechanischen Bewegungen. Natürlich muss der Antrieb in sich selbst sehr wohl präzise sein: Er muss Signale genau auswerten können. Aber er muss seine Ausgangsgeschwindigkeit, sein Ausgangsdrehmoment oder seine Ausgangsposition nicht auf den Hundertstel millimeter genau einstellen können, da der Roboter dies mit der Software abfangen und korrigieren kann. Für bestimmte Anwendungszwecke ist das ausreichend. Wichtig: Andere, etwa Operationsroboter, brauchen mehr Genauigkeit. Dort kommen andere Lösungen von maxon zum Einsatz.

Wenn du eine Carte blanche hättest: Welche Aktuatorlösung für die Robotik würdest du in der Zukunft noch entwickeln?

Wenn ich etwas Neues an den Markt bringen würde, dann müsste es etwas sein, das eine fundamental andere Physik nutzt als bisher. Die vielleicht nicht mehr primär elektromagnetisch aktuiert. Das wären zum Beispiel elektrostatische Aktuatoren. Die Forschung dazu steckt noch in den Kinderschuhen. Aber auch bei den Materialwissenschaften könnte man ansetzen (siehe S. 30): Gibt es spannende Materialien, welche die Physik verändern können? Da gibt es viel Innovationspotenzial, auch für ein Unternehmen wie maxon. Forschungsmässig wird das aber noch Jahre dauern, bis es hier zu Fortschritten kommt.

Wie man Robotern Körpergefühl schenkt

Künstliche Intelligenz macht Roboter klüger. Doch ausgerechnet daran, was Menschen körperlich leicht fällt – greifen, spüren, sich anpassen –, scheitern Maschinen. Prof. Hedan Bai sucht die Lösung nicht in Algorithmen, sondern im Körper selbst: in Materialien, die von der Biologie inspiriert sind und Robotern physische Intelligenz verleihen sollen.

Aufgezeichnet von: Katharina Rilling



Was mich antreibt? Mein Traum: Roboter zu entwickeln, die nicht nur so intelligent wie Menschen handeln, sondern deren Körper auch etwas von jener Anpassungsfähigkeit besitzen, die biologische Systeme über Millionen Jahre der Evolution entwickelt haben. Dafür müssen wir Roboter anders denken: nicht nur als Maschinen mit Algorithmen, sondern als körperliche Systeme – samt Materialien, Sensoren und Aktuatoren, die wahrnehmen, reagieren, lernen und sich verändern können.

Kein Gehirn ohne Körper

Bisher wurden Roboter vor allem in definierten Umgebungen und für klar definierte Aufgaben eingesetzt. Neuere Modelle sollen uns jedoch auch in unkontrollierten Situationen unterstützen: zu Hause, im Spital oder in der Fabrik, wo Roboter zunehmend komplexere Aufgaben übernehmen. Doch können robotische Technologien, die ursprünglich für hochpräzise und wiederholende Abläufe entwickelt wurden, überhaupt mit dieser neuen Art von Herausforderung umgehen – mit Situationen, die von Unsicherheit, wechselnden Bedingungen und Multitasking geprägt sind? Wir fordern von ihnen nicht weniger, als so zu handeln wie wir Menschen.

Aus diesem Grund macht es Sinn, uns in der Forschung selbst zum Vorbild zu nehmen. Ein zentraler Ansatz in der Robotik beschäftigt sich mit Embodied Intelligence. Dabei geht es darum, Künstliche Intelligenz, also eine Art Gehirn, direkt mit dem Körper eines Roboters zu verbinden, damit er seine Umgebung wahrnehmen, Entscheidungen treffen und intelligent handeln kann.

Wenn wir den menschlichen Körper betrachten, sehen wir aber, wie fundamental er sich von heutigen Roboterkörpern unterscheidet. In der Robotik sprechen wir von Aktuatoren – also Bauteilen, die Bewegung erzeugen. Beim Menschen übernehmen diese Rolle die Muskeln. Davon haben wir Hunderte, die fein abgestimmt zusammenarbeiten. Sobald es darum geht, welche «Muskeln» eine Maschine einsetzt oder welche Informationen sie aus ihrer Umgebung wahrnimmt und weiterverarbeitet, stösst der KI-zentrierte Ansatz an Grenzen. Von der Beweglichkeit, Vielseitigkeit und Selbstverständlichkeit, mit der Menschen handeln, sind heutige Systeme noch weit entfernt.

Dazu fällt mir Moravec's Paradox ein. Es besagt, dass gerade die Dinge, die Menschen mühelos tun – gehen, greifen, balancieren, sehen, sich in einer unübersichtlichen Umgebung zurechtfinden –, für Roboter besonders schwierig sind. Aufgaben dagegen, die uns anspruchsvoll erscheinen, etwa rechnen oder Schach spielen, lassen sich für Maschinen vergleichsweise gut formalisieren. Der Grund liegt in unserer evolutionären Geschichte: Was uns heute selbstverständlich erscheint, ist das Ergebnis von Millionen Jahren Anpassung. Der Mensch besteht nicht nur aus Intelligenz, nicht nur aus einem Gehirn. Die Natur hat Körper hervorgebracht, die ständig wahrnehmen, reagieren, kompensieren und lernen. Genau diese scheinbare Selbstverständlichkeit ist für die Robotik eine der grössten Herausforderungen.

Unsere Forschung versucht, diese Lücke zu schliessen und einen neuen Weg zu gehen. Wir fragen: Welche Materialien, Strukturen und Aktuatoren braucht es, damit

Roboter eines Tages ähnlich leistungsfähig, anpassungsfähig und vielseitig werden wie biologische Körper? Unser Ziel ist es also, physische Intelligenz in den Materialien von Robotern zu entwickeln.

Anpassen, trainieren

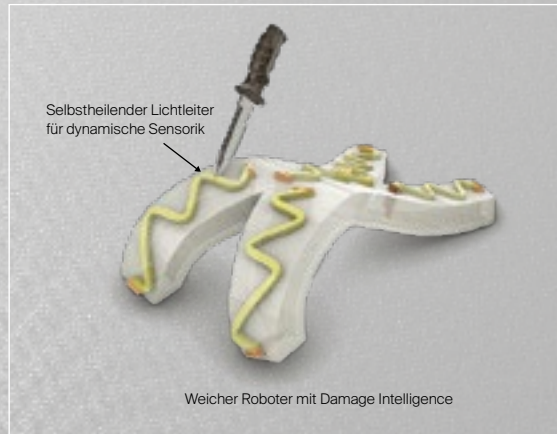
Ein zentraler Punkt dabei ist die Adaptivität – die Fähigkeit, sich an veränderte Bedingungen anzupassen. Wenn wir verletzt sind, heilt sich unser Körper in vielen Fällen selbst. Wird hingegen die Oberfläche eines Roboters beschädigt, ist er schlicht kaputt. Wenn wir bestimmte Aufgaben immer wieder ausführen, etwa mit einem Hammer arbeiten oder Tennis spielen, lernen wir dazu. Durch Übung werden wir besser, präziser und effizienter. Unsere Muskeln entwickeln sich weiter. Bei Robotern passiert das bisher nicht. Die zentrale Frage ist also: Wie lässt sich dieses Weiterentwickeln und Trainieren auch ins Material eines Roboters übertragen? Hier sehe ich besonders viel Potenzial – bei aller Liebe zur KI.

Dazu prüfen wir Materialien, die sich grundlegend von dem unterscheiden, was man heute in vielen Robotern sieht. Ein Beispiel sind meine jüngsten Arbeiten mit weichen, intelligenten Materialien. In solche Materialien lassen sich selbstheilende Eigenschaften einbauen, etwa für robotische Sensoren, die sich nach einer Beschädigung selbst reparieren können. Der Vorteil: Man kann das Material immer wieder einschneiden, und jedes Mal heilt es erneut. Dadurch entsteht nicht nur ein robusteres System. Der Roboter erkennt selbst, wenn er beschädigt wurde, kann darauf reagieren und gleichzeitig seine Funktion wiederherstellen – ohne dass dafür eine externe Kontrolle notwendig wäre.

Ich nenne das Damage Intelligence: eine Form von Intelligenz, die nicht nur in Algorithmen liegt, sondern im Umgang mit Beschädigung, Heilung und Wiederherstellung im Material selbst.

Ein weiterer Schwerpunkt unserer Forschung ist, Licht als Stimulus zu nutzen, um robotische Funktionen auszulösen, etwa Bewegung, Aktivierung oder Sensorik. Die Inspiration kommt aus der Kommunikationstechnologie: Früher wurden Informationen über Kupferkabel übertragen, heute läuft ein grosser Teil der globalen Kommunikation über Glasfasern. Der Grund ist einfach: In einer optischen Faser lassen sich sehr viel mehr Informationen transportieren als in einem herkömmlichen Kabel. Genau diese Idee der höheren Kapazität interessiert uns. Wir fragen uns: Können wir Licht und optische Materialien nutzen, um viele Aktuator- und Sensorfunktionen auf sehr kleinem Raum zu bündeln?

Ein Ansatz ist also, Maschinen mit riesigen Datenmengen lernen zu lassen, damit sie verstehen, wie bestimmte Tätigkeiten funktionieren. Doch ich kann mir auch eine andere Möglichkeit vorstellen – eine, die dem Menschen ähnlicher ist: einen Roboter, der mit einem anpassungsfähigen Körper, Sensoren und Lernfähigkeit ausgestattet ist und selbst beginnt, die Welt zu erkunden. Er würde aus-



In der Materialwissenschaft arbeitet man an selbstheilender Haut für Roboter.

probieren, variieren, scheitern, sich anpassen und Erfahrungen sammeln. Mit jedem Versuch würde nicht nur der Algorithmus lernen, sondern das ganze System: Sensorik, Bewegung, Material und Körper. Statt ihm jede Handlung vorher beizubringen, sagt man ihm: Geh los, probiere aus, finde verschiedene Wege – und lerne dabei, welche am besten funktionieren. Genau das ist meine Vision.



Hedan Bai

Hedan Bai ist Professorin für Robotikmaterialien an der ETH Zürich. Ihre Forschung zielt darauf ab, weiche Roboter zu entwickeln, welche die Eigenschaften lebender Organismen nachahmen: Sie sollen sich an dynamische Umgebungen anpassen, autonom reagieren und künftig robuster, flexibler und lernfähiger werden. Die Materialien ähneln in ihrer Struktur und Funktion der menschlichen Muskulatur. Um die dicht gepackten Antriebselemente im künstlichen Muskel individuell anzusteuern, setzt Bai auf die grosse Bandbreite des Lichts. Damit stimuliert sie Muskeln, was zu einer überragenden Antriebskapazität führt. Das Robotermaterial lässt sich vielseitig einsetzen, etwa als Bauelement von neuartigen, physisch intelligenten Maschinen oder für die Entwicklung von Robotern, die gefährliche Umgebungen erkunden oder in der Chirurgie eingesetzt werden können.

Robotic Materials Group

Die Robotic Materials Group unter der Leitung von Prof. Hedan Bai wurde 2023 gegründet. Sie ist ein internationales und interdisziplinäres Team aus der Materialwissenschaft, Chemie und Robotik mit Leidenschaft für die Robotik der Zukunft. Das Team verfolgt einen Bottom-up-Ansatz in der Robotik und entwickelt Materialien, die ungewöhnliche Formen und unkonventionelle Funktionen ermöglichen – und damit neue Möglichkeiten für robotische Systeme eröffnen.

Das Glossar der Robotik

Die Robotik hat ihre eigene Terminologie. Hier eine Übersicht – natürlich ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Antriebssystem Gesamtheit aus Motor, Getriebe und Leistungselektronik zur Erzeugung und Übertragung von Bewegung. Es setzt elektrische Energie in mechanische Bewegung um und passt diese an die Anforderungen der Anwendung an. In der Robotik bestimmt das Antriebssystem maßgeblich Dynamik, Präzision und Effizienz. Die Auswahl und die Auslegung sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines Roboters.

Aktuator Bauteil, das elektrische Signale in eine physische Bewegung oder Kraft umwandelt. Also zum Beispiel bei Elektromotoren Strom in eine mechanische Drehbewegung.

Automated Guided Vehicle (AGV) Mobiles Robotersystem zum automatisierten Transport von Gütern innerhalb von Produktions- oder Logistikumgebungen. Es folgt vordefinierten Routen oder Markierungen am Boden. AGVs werden häufig in intralogistischen Prozessen eingesetzt. Sie erhöhen Effizienz und reduzieren manuelle Transportaufwände.

Autonomer mobiler Roboter (AMR) Weiterentwicklung des AGV mit erhöhter Autonomie und flexibler Navigation. Er nutzt Sensorik und Algorithmen, um sich dynamisch in seiner Umgebung zu orientieren und Hindernissen auszuweichen. AMRs können ohne feste Infrastruktur eingesetzt werden. Sie werden zunehmend in modernen Logistiksystemen verwendet.

Autonome Navigation Fähigkeit eines Roboters, sich ohne menschliches Eingreifen in einer

Umgebung zu orientieren und zu bewegen.

Autonomer Roboter Ein Roboter, der Aufgaben ohne kontinuierliche menschliche Steuerung ausführen kann. Er trifft Entscheidungen basierend auf Sensorinformationen und vordefinierten Algorithmen. Autonome Roboter sind in der Lage, sich an verändernde Umgebungen anzupassen. Sie werden etwa in der mobilen Robotik und Forschung eingesetzt.

Achszahl Anzahl der beweglichen Freiheitsgrade eines Roboters (z. B. 6-Achs-Roboter).

Arbeitsraum (Workspace) Räumlicher Bereich, den ein Roboter mit seinem Endeffektor erreichen kann. Er wird durch die Kinematik, Geometrie und Bewegungsgrenzen des Systems bestimmt. Der Arbeitsraum ist eine zentrale Größe für die Planung von Anwendungen und Anlagenlayout. Seine Ausnutzung beeinflusst Effizienz und Flexibilität eines Roboters.

Backlash (Spiel) Bezeichnet in der Robotik das mechanisch bedingte Spiel zwischen bewegten Komponenten, insbesondere in Getrieben oder Gelenken. Es beschreibt den Bereich, in dem bei einem Richtungswechsel zunächst eine Bewegung des Antriebs erfolgt, ohne dass diese direkt auf das Antriebselement übertragen wird. Backlash kann die Positionsgenauigkeit und Bewegungspräzision eines Roboters negativ beeinflussen.

Cartesian-Roboter (Portalroboter) Roboter mit linearen Achsen,

die entlang kartesischer Koordinaten (x, y, z) angeordnet sind. Er ermöglicht einfache und präzise Bewegungen in geraden Linien. Cartesian-Roboter werden häufig in Pick-and-Place-, CNC- oder 3D-Druck-Anwendungen eingesetzt. Ihr Aufbau ist modular und vergleichsweise einfach zu steuern.

Cobot (Collaborative Robot) Industrieroboter, der für die direkte und sichere Zusammenarbeit mit Menschen ausgelegt ist. Durch integrierte Sensorik und Sicherheitsmechanismen kann er auf seine Umgebung reagieren und den Menschen bei Aufgaben unterstützen, insbesondere in flexiblen Produktionsprozessen.

Compliance (Nachgiebigkeit) Eigenschaft eines mechanischen oder regelungstechnischen Systems, auf Kräfte flexibel zu reagieren. In der Robotik beschreibt sie die Fähigkeit, kontrolliert nachzugeben und Kräfte zu absorbieren. Compliance ist wichtig für sichere Mensch-Roboter-Interaktion und präzise Kontaktaufgaben. Sie kann mechanisch oder durch Regelung realisiert werden.

Controller Zentrale Steuereinheit eines Roboters, die Bewegungen berechnet, überwacht und koordiniert. Er verarbeitet Sensordaten, führt Regelalgorithmen aus und steuert die Aktuatoren in Echtzeit. Leistungsfähige Controller können durch intelligente Regelung und Softwarefunktionen mechanische Anforderungen reduzieren und so die Konstruktion vereinfachen.

Delta-Roboter Parallelkinematischer Roboter mit mehreren Armen, die gemeinsam einen Endeffektor bewegen. Er eignet sich besonders für schnelle Pick-and-Place-Anwendungen mit geringem Gewicht. Delta-Roboter zeichnen sich durch hohe Dynamik und Präzision bei kurzen Zykluszeiten aus. Sie werden häufig in Verpackungs- und Lebensmittelindustrien eingesetzt.

Direktantrieb Bezeichnet in der Robotik ein Antriebskonzept, bei dem ein Gelenk oder eine Achse ohne zwischengeschaltetes Getriebe direkt von einem Motor angetrieben wird. Dies ermöglicht hohe Positioniergenauigkeit, Dynamik und spielfreie Bewegung, erfordert jedoch leistungsstarke Motoren und eine präzise Regelung.

Dynamik Teilgebiet der Mechanik, das die Wirkung von Kräften und Momenten auf die Bewegung von Systemen beschreibt. In der Robotik beschreibt sie das Verhalten eines Roboters bei Beschleunigung, Verzögerung und Laständerung. Die Dynamik ist entscheidend für die Auslegung von Antrieben und Regelungen. Sie beeinflusst maßgeblich Geschwindigkeit, Stabilität und Energieeffizienz.

Encoder Sensor zur Erfassung von Position, Drehzahl oder Winkel eines Antriebs.

End-Effektor Werkzeug am Ende eines Roboterarms, z. B. Greifer, Schweißgerät oder Kamera. Bei humanoiden Robotern bezeichnet der End-Effektor auch die Hand.

Feedback-Regelung Regelstrategie, bei der der aktuelle Istwert eines Systems kontinuierlich erfasst und mit einem Sollwert verglichen wird. Abweichungen werden durch entsprechende Stellgrössen aktiv ausgeglichen. Die Feedback-Regelung bildet die Grundlage vieler automatisierter Systeme und ermöglicht eine stabile und präzise Steuerung. Sie wird häufig in Kombination mit Feedforward-Regelung eingesetzt.

Feedforward-Regelung Regelstrategie, bei der bekannte Einflüsse oder Störgrössen im Voraus kompensiert werden. Sie basiert auf einem Modell des Systems und wirkt ergänzend zur klassischen Feedback-Regelung. Dadurch lassen sich Genauigkeit und Dynamik verbessern, insbesondere bei schnellen oder stark vorhersehbaren Bewegungsabläufen.

Freiheitsgrad (Degrees of Freedom, DoF) Anzahl unabhängiger Bewegungsrichtungen eines Systems. In der Robotik beschreibt sie, wie viele unabhängige Achsen oder Gelenke ein Roboter besitzt, die separat angesteuert werden können. Die Anzahl der Freiheitsgrade bestimmt massgeblich die Beweglichkeit und Flexibilität des Systems bei der Ausführung von Aufgaben. Ein höherer DoF ermöglicht komplexere Bewegungen, erhöht jedoch auch die Anforderungen an Steuerung und Regelung.

Functional Safety Teilbereich der System- und Anlagensicherheit, der sich mit der sicheren Funktion von Steuerungen und elektronischen Systemen befasst. Ziel ist es, Risiken aufgrund von Fehlfunktionen durch geeignete Massnahmen zu reduzieren oder zu beherrschen. In der Robotik umfasst Functional Safety unter anderem sichere Zustände, Fehlererkennung und definierte Reaktionen im Störfall. Sie basiert auf internationalen Normen wie IEC 61508 oder ISO 13849.

Greifer (Gripper) Mechanische, pneumatische oder elektrische Vorrichtung zum Halten, Positionieren und Bewegen von Werkstücken. Er ist ein zentraler Endeffektor in der Robotik und bestimmt massgeblich die Handhabungsfähigkeit eines Systems. Greifer gibt es in verschiedenen Bauformen, etwa Parallel-, Winkel- oder Vakuumgreifer, angepasst an Form und Material des Werkstücks. Die Auswahl des Greifers beeinflusst Präzision, Taktzeit und Prozesssicherheit einer Anwendung.

Humanoider Roboter Ein Roboter, dessen Aufbau und Bewegungsstruktur an den menschlichen Körper angelehnt ist. Er verfügt typischerweise über einen Kopf, einen Rumpf sowie Arme und Beine mit entsprechenden Gelenken. Humanoide Roboter sind darauf ausgelegt, in für Menschen gestalteten Umgebungen zu arbeiten. Sie werden häufig in Forschung, Serviceanwendungen und bei der Mensch-Roboter-Interaktion eingesetzt.

Human Machine Interface (HMI) Schnittstelle zur Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Sie ermöglicht die Überwachung, Steuerung und Bedienung technischer Systeme über visuelle oder haptische Elemente wie Displays, Taster oder Touchscreens. In der Robotik dient die HMI dazu, Programme zu erstellen, Prozesse zu überwachen und Zustände in Echtzeit darzustellen.

Industrieroboter Stationärer Roboter zur Automatisierung von Fertigungsprozessen, etwa in der Montage, Schweisstechnik oder Handhabungstechnik. Er ist meist als Knickarm- oder Cartesian-Roboter ausgeführt und arbeitet in strukturierten Umgebungen. Industrieroboter zeichnen sich durch hohe Präzision, Geschwindigkeit und Wiederholgenauigkeit aus. Sie sind ein zentraler Bestandteil moderner Produktionsanlagen.

Inverse Kinematik Berechnung der erforderlichen Gelenkwinkel, um eine bestimmte Position und Orientierung des End-Effektors im Raum zu erreichen. Sie bildet das Gegenstück zur Vorwärtskinematik und ist ein zentrales Problem in der Robotik. Die inverse Kinematik kann je nach System mehrere Lösungen besitzen oder mathematisch anspruchsvoll sein. Sie wird in der Bewegungsplanung eingesetzt, um gewünschte Trajektorien in konkrete Gelenkbewegungen umzusetzen.

Joint (Gelenk) Bewegliche Verbindung zwischen zwei Segmenten eines Roboters. Es ermöglicht definierte Relativbewegungen, zum Beispiel Rotation oder Translation, entlang einer oder mehrerer Achsen. Gelenke bestimmen massgeblich die Freiheitsgrade und die Beweglichkeit eines Roboters. Je nach Bauart und Antrieb beeinflussen sie auch Präzision, Traglast und Dynamik des Systems. maxon bietet hier die High Efficiency Joints an. Für hochpräzise Bewegungen kommen auch High Precision Joints zum Einsatz.

Kalibrierung Verfahren zur Bestimmung und Korrektur von Abweichungen zwischen einem realen System und seinem Modell. In der Robotik dient die Kalibrierung dazu, die Genauigkeit von Positionierung und Bewegung zu verbessern. Dabei werden systematische Fehler, etwa durch Fertigungstoleranzen, ausgeglichen. Eine regelmässige Kalibrierung ist wichtig für gleichbleibende Prozessqualität.

Kinematik Lehre der Bewegung von Körpern ohne Berücksichtigung der wirkenden Kräfte. In der Robotik beschreibt sie die geometrischen Zusammenhänge zwischen Gelenken und Gliedern eines Roboters sowie deren Einfluss auf Position und Orientierung. Sie bildet die Grundlage für Vorwärts- und inverse Kinematik und ist entscheidend für die Bewegungsplanung. Die kinemati-

sche Modellierung bestimmt, wie präzise und effizient ein Roboter Aufgaben im Raum ausführen kann.

Kollisionsvermeidung Verfahren zur Verhinderung von Zusammenstössen zwischen Roboter, Menschen und Umgebung. Dabei werden Sensoren, Modelle und Algorithmen genutzt, um potenzielle Kollisionen frühzeitig zu erkennen. In der Robotik ist sie ein zentraler Bestandteil sicherer und effizienter Bewegungsplanung. Kollisionsvermeidung kommt sowohl in stationären als auch in mobilen Systemen zum Einsatz.

Lastmoment Drehmoment, das ein Antrieb aufbringen muss, um eine bestimmte Last in einer Anwendung zu bewegen oder zu halten. Es ergibt sich aus Kräften, Hebelarmen und der Kinematik des Systems. Das Lastmoment ist eine zentrale Kenngrösse für die Auslegung von Motoren und Getrieben. Eine korrekte Bestimmung ist entscheidend für Leistung, Lebensdauer und Betriebssicherheit des Antriebs.

Mobiler Roboter Roboter, der sich autonom oder ferngesteuert in seiner Umgebung bewegen kann. Er nutzt Antriebssysteme wie Räder, Ketten oder Beine zur Fortbewegung. Mobile Roboter werden häufig in Logistik, Service oder Inspektion eingesetzt. Sie benötigen Sensorik und Navigationsalgorithmen zur Orientierung im Raum.

Motion Control Präzise Steuerung von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung von Bewegungen in einem mechatronischen System. Sie umfasst das Zusammenspiel von Controller, Sensoren und Aktuatoren zur exakten Ausführung von Bewegungsabläufen. In der Robotik ermöglicht Motion Control eine hochgenaue und dynamische Führung von Achsen und End-Effektoren. Sie ist entscheidend für Anwendungen mit hohen



Anforderungen an Wiederholgenauigkeit, Synchronisation und Prozessqualität.

Parallelroboter Robotersystem, bei dem mehrere kinematische Ketten parallel auf einen Endeffektor wirken. Diese Bauweise ermöglicht eine hohe Steifigkeit und Dynamik bei gleichzeitig geringer bewegter Masse. Parallelroboter werden in Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen eingesetzt. Beispiele sind Delta-Roboter oder Stewart-Plattformen.

Payload (Nutzlast) Maximales Gewicht, das ein Roboter unter definierten Bedingungen bewegen kann. Sie bezieht sich in der Regel auf die Last am Endeffektor, einschliesslich Werkzeug und Werkstück. Die Nutzlast hängt von Faktoren wie Reichweite, Geschwindigkeit und Einbaulage ab. Eine Überschreitung der Payload kann zu verminderter Genauigkeit, erhöhtem Verschleiss oder Schäden am System führen.

Präzision Mass für die Genauigkeit, mit der ein Roboter eine Zielposition erreicht und wiederholt anfahren kann. Sie umfasst sowohl die Positionsgenauigkeit als auch die Wiederholgenauigkeit eines Systems. Hohe Präzision ist entscheidend für Anwendungen mit engen Toleranzen, etwa in der Montage oder Fertigung. Sie wird durch Faktoren wie Mechanik, Sensorik und Regelung beeinflusst.

Quadruped-Roboter Mobiler Roboter mit vier Beinen, dessen Fortbewegung an die von vierbeinigen Tieren angelehnt ist. Er nutzt koordinierte Laufbewegungen, um sich in unebenem oder schwierigem Gelände stabil zu bewegen. Quadruped-Roboter zeichnen sich durch hohe Geländegängigkeit und Flexibilität aus. Sie werden häufig in Forschung, Inspektion, Rettungseinsätzen und militärischen Anwendungen eingesetzt.

Quasi Direct Drive (QDD) Antriebskonzept mit sehr niedriger Getriebeuntersetzung, das die Vorteile von Direktantrieben (hohe Dynamik, gutes Regelverhalten) mit den Vorteilen von Getrieben (höheres Drehmoment) kombiniert. QDD-Systeme ermöglichen eine besonders feinfühligte Kraftregelung und werden häufig in kollaborativen Robotern und dynamischen Anwendungen eingesetzt. Bei maxon gehören die High Efficiency Joints zu den QDD-Antrieben.

Regelkreis Geschlossenes System aus Sensor, Regler und Aktuator zur Steuerung einer physikalischen Grösse. Der Istwert wird kontinuierlich gemessen und mit dem Sollwert verglichen, um Abweichungen zu korrigieren. Regelkreise bilden die Grundlage für präzise und stabile Bewegungsabläufe in der Robotik. Sie sind ein zentrales Element von Servoantrieben und Motion-Control-Systemen.

SCARA-Roboter Roboter mit selektiv nachgiebiger Struktur, der hauptsächlich in der Ebene arbeitet. Er verfügt typischerweise über rotatorische Gelenke für schnelle und präzise Bewegungen. SCARA-Roboter werden häufig in Montage- und Handhabungsaufgaben eingesetzt. Sie bieten eine gute Kombination aus Geschwindigkeit, Genauigkeit und Steifigkeit.

Sensor Bauteil zur Erfassung physikalischer Grössen wie Position, Kraft, Temperatur oder Abstand. Sensoren liefern die notwendigen Informationen zur Überwachung und Regelung von Robotersystemen. In der Robotik sind sie essenziell für Wahrnehmung, Navigation und Interaktion mit der Umgebung. Sie bilden die Grundlage für präzise und adaptive Bewegungen.

Serviceroboter Roboter zur Unterstützung von Menschen ausserhalb industrieller Produktionsumgebungen. Er wird beispielsweise in Haushalt,

Medizin, Pflege oder Gastronomie eingesetzt. Serviceroboter sind häufig auf Interaktion und Benutzerfreundlichkeit ausgelegt. Sie arbeiten oft in unstrukturierten oder halbstrukturierten Umgebungen.

Servoantrieb Geschlossener Regelkreis aus Motor, Sensor und Regler zur hochgenauen Bewegungssteuerung. Er erfasst kontinuierlich den Istzustand und vergleicht ihn mit dem Sollwert, um Abweichungen aktiv auszugleichen. Servoantriebe ermöglichen präzise Positionierung, hohe Dynamik und stabile Regelung. Sie werden häufig in Robotik, CNC-Maschinen und Automatisierungssystemen eingesetzt.

Sicherheitssteuerung System zur Gewährleistung sicherer Roboteroperationen. Sie überwacht sicherheitsrelevante Funktionen wie Not-Halt, sichere Geschwindigkeits- und Positionsüberwachung oder Schutztüren. Im Gefahrenfall greift die Sicherheitssteuerung ein und bringt den Roboter in einen sicheren Zustand. Sie ist ein zentraler Bestandteil moderner Robotersysteme und erfüllt normierte Sicherheitsanforderungen.

Sim2Real Gap Unterschied zwischen dem Verhalten eines Roboters in einer Simulation und in der realen Welt. Er entsteht durch vereinfachte Modelle, ungenaue Parameter oder nicht vollständig erfasste physikalische Effekte in der Simulation. In der Robotik ist der Sim2Real Gap eine zentrale Herausforderung bei der Übertragung von Algorithmen aus der Simulation in reale Anwendungen. Seine Reduktion ist entscheidend für zuverlässige und robuste Systeme.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) Verfahren, bei dem ein Roboter gleichzeitig seine Position bestimmt und eine Karte seiner Umgebung erstellt. Es wird vor allem in der mobilen Robotik eingesetzt, um sich in

unbekannten Umgebungen zu orientieren. SLAM kombiniert Sensordaten mit Algorithmen zur Positionsschätzung und Kartenerstellung. Es ist eine Schlüsseltechnologie für autonome Navigation.

Strukturierte Umgebung Umgebung, in der Objekte, Abläufe und Randbedingungen klar definiert und weitgehend konstant sind. In der Robotik bedeutet dies, dass Positionen, Geometrien und Prozessschritte vorhersehbar und reproduzierbar sind. Strukturierte Umgebungen erleichtern die Automatisierung und ermöglichen eine hohe Prozesssicherheit. Sie stehen im Gegensatz zu unstrukturierten Umgebungen, die variabler und schwieriger zu handhaben sind.

Teach-in / Teaching Verfahren zur Programmierung eines Roboters durch Vormachen oder manuelles Verfahren der Bewegungen. Dabei wird der Roboter über ein Bediengerät oder direkt von Hand entlang der gewünschten Trajektorie geführt. Die aufgezeichneten Positionen und Abläufe werden anschliessend als Programm gespeichert und automatisiert wiedergegeben. Teach-in eignet sich besonders für einfache Anwendungen und ermöglicht eine intuitive Inbetriebnahme ohne tiefgehende Programmierkenntnisse.

Torque (Drehmoment) Mass für die Drehkraft eines Antriebs. Es beschreibt die Fähigkeit, eine Last um eine Achse zu drehen, und ergibt sich aus Kraft und Hebelarm. In der Robotik ist das Drehmoment eine zentrale Kenngrösse zur Auslegung von Antrieben und Getrieben. Es beeinflusst massgeblich Traglast, Dynamik und Beschleunigungsvermögen eines Systems. ■■■

maxon

Der Magnet für Talente aus aller Welt

Ein weltweit tätiges Unterhaltungsunternehmen erweckt Charakter-Roboter zum Leben, ein Start-up bringt einem Roboter den Umgang mit Tomaten bei, und Roboterhunde sind in der Stadt unterwegs – all das geschieht in Zürich.

Die Schweizer Stadt ist zu einem wichtigen Robotik-Hub geworden.

Und maxon ist mittendrin.

Text: Sven Gallinelli **Fotos:** Lucas Ziegler





Zürich – die grösste Stadt der Schweiz. Im Stadtteil Oerlikon geht alles seinen alltäglichen Weg: Trams fahren, an der Bushaltestelle hinter dem Bahnhof hat es mehr Menschen als Platz, und in den Studios des Schweizer Fernsehens wird das Tagesprogramm produziert. Doch ganz so gewöhnlich wie anderswo ist der Blick hier aus dem Fenster nicht: Denn in Oerlikon dreht schon mal ein sogenannter Quadruped seine Runden auf dem Trottoir. Die Firma ANYbotics, die solche vierbeinigen Roboter herstellt und mit maxon eng zusammenarbeitet, nutzt ihre Nachbarschaft gerne als Übungsgelände. Was nach einer Szene aus der Zukunft klingt, gehört in Oerlikon zum Strassenbild dazu.

Drohnen, Fahrzeuge, Gelenke

Zürich ist in den letzten Jahren zu einem Robotik-Hotspot geworden, unzählige Robotikfirmen haben sich hier angesiedelt. Manche sind mit ihren Produkten schon am Markt, andere sind noch in der Konzeptphase. Manche bauen Roboter, Drohnen oder Fahrzeuge, andere kümmern sich um die Software – oder wie maxon um die Gelenke.

Die «Greater Zurich Area» ist die Standortmarketing-Organisation des Wirtschaftsraums Zürich und hat das Robotikthema längst auf dem Radar. Ganz selbstbewusst spricht man von Zürich als dem «Silicon Valley der Robotik».

Auf einer Karte auf der Website der Organisation werden die Robotik-Keyplayer fein säuberlich aufgelistet – über 100 sind es. Universitäten, Forschungsinstitutionen, Robotikfirmen, Softwarehersteller, aber auch die grossen Tech-Konzerne wie Google, Meta, Microsoft oder Apple: Sie alle sind in Zürich vor Ort, und die Liste ist längst nicht abschliessend. Auch maxon unterhält mit dem Robotics Lab ein eigenes Büro – nur ein paar Etagen über der ANYbotics-Werkstatt – und befindet sich somit in bester Gesellschaft.

Prominente Firmen

Rund um Zürich ist in den vergangenen Jahren ein Robotik-Ökosystem entstanden, das von Filmfiguren bis zu Industrierobotern reicht. Disney betreibt hier sein einziges Forschungszentrum ausserhalb der USA, und dieses konstruiert Roboter, die auf Filmcharakteren basieren. Hexagon entwickelte mit «AEON»

einen lernfähigen humanoiden Industrieroboter, der bereits in BMW-Werken getestet wird. Start-ups wie Aithon Robotics arbeiten an Drohnen, die sich für Inspektions- oder Reparaturarbeiten an Oberflächen festsaugen können, während Dufour Aerospace senkrecht startende Fluggeräte für Logistik- und Rettungseinsätze entwickelt.

Andere Unternehmen konzentrieren sich auf hochspezialisierte Anwendungen: Floating Robotics automatisiert mit KI-gestützten Gewächshausrobotern die Tomatenernte, NauticaHYDRA entwickelt Reinigungsroboter für Frachtschiffe, und Loki baut Serviceroboter, die Küchen und Toiletten reinigen. Einige dieser Systeme haben eines gemeinsam: Sie werden von Technologien aus der Region angetrieben – etwa Robotikgelenken und Antriebssystemen von maxon.

Ob alle diese Projekte am Markt erfolgreich sein werden? Das ist eine offene Frage. Klar aber ist: Nebst KI gehört die Robotik zu den absoluten Hype-Themen im Technologiesektor, und das haben auch Investoren für sich entdeckt. Entsprechend viel Venture-Kapital fliesst derzeit in die Branche. Wie viel Wertschöpfung der Robotik-Cluster bringt, dazu gibt es keine genauen Zahlen. Laut der Investoren-Datenplattform Valindex soll der Schweizer Robotiksektor 3,2 Milliarden CHF schwer sein; ein grosser Anteil dürfte auf Zürich entfallen.

Die ETH wirkt wie ein Booster

Warum aber ist Zürich für Robotikfirmen so beliebt? Für die Antwort reichen drei Buchstaben: ETH. Die Eidgenössische Technische Hochschule zählt zu den führenden Hochschulen im Bereich der Robotik und hat prägende Figuren hervorgebracht. Etwa Marco Hutter, Leiter des Robotics and AI Institute. Er forscht seit Jahren an Laufrobotern, autonomen Maschinen und war Mitgründer von ANYbotics. Zudem forschen er und seine Teams daran, wie sich Roboter in unstrukturierten Umgebungen fortbewegen können.

Auch Alessandro Forino, Head of Robotic Drive Systems und Leiter des Robotic Labs von maxon in Zürich, hebt die Magnetwirkung der ETH für die Robotikszene hervor. «Die Hochschule zieht Talente aus aller Welt an. Viele davon gründen später eigene Unternehmen oder wechseln in die Industrie», sagt er. Er schaut aus dem Fenster seines Büros in

Zürich: «Dutzende Robotikfirmen befinden sich hier in Gehdistanz.» Entsprechend gut vernetzt sei man.

maxon bringt Bewegung ins Spiel

Dass maxon sich mitten im Herz dieser Entwicklung befindet, ist kein Zufall – denn Antriebe sind eine Kerntechnologie der Robotik: Ohne Aktuatoren gibt es keine Bewegung. Mit den High Efficiency Joints, die Aktuatorik unkompliziert als Plug-and-Play-System zur Verfügung stellen, deckt maxon ein wichtiges Bedürfnis von Robotikunternehmen ab.

Der Robotikantrieb von maxon repräsentiert aber auch für das Unternehmen selbst die Zukunft. Lange verstand sich maxon als Anbieter von Komponenten. Innovationen wie das Robotergelenk repräsentieren einen neuen Ansatz, bei dem maxon ein integrierbares System liefert. «Dieser System-Engineering-Ansatz ist in der Praxis ein sehr organischer iterativer Prozess mit enger Kundenzusammenarbeit», so Alessandro.

Hinzu kommt, dass Roboter sehr komplexe Systeme sind, die perfekt aufeinander abgestimmt sein müssen. «Bei Robotiksystemen reicht es nicht, einfache Kennwerte wie Strom oder Leerlaufdrehzahl zu messen», sagt Alessandro. «Es müssen dynamische Verläufe und Regelbarkeit miteinbezogen werden.»

Gelenk muss einfach integrierbar sein

Der technologische Trend in der Robotik hat sich in den letzten Jahren stark verändert. Die Robotikgelenke etwa wurden intelligenter und deren Integrationsgrad höher. Dies führt dazu, dass der übergeordneten Steuerung eines Roboters ein klar definiertes und stabiles Interface zur Verfügung steht. Oder mit anderen Worten: Wenn der Aktuator sauber läuft und problemlos integrierbar ist, müssen sich Ingenieure darüber nicht mehr viele Gedanken machen.

Früher waren Robotikgelenke mechanisch sehr komplex mit Sensorik, Federn und Drehmomentsensoren. Fortschritte in Bereichen wie Reinforcement Learning ermöglichen es heute, zahlreiche Aufgabensoftwareseitig zu lösen, die früher aufwendige elektromechanische Lösungen erforderten. Viele Robotikunternehmen sehen ihr Kern-Know-how heute im Bereich der Software. Die Innovationsschübe in der Robotik waren in den letzten Jahren gross, was mit ein Grund

Robotik-Firmen in der Region Zürich



ist, weshalb das Robotik-Ökosystem in Zürich gedeiht. Es gibt aber nach wie vor ungelöste Probleme.

«Weitgehend gelöst ist die Fortbewegung von Robotern in fester Umgebung», sagt Alessandro Forino. Der nächste Schritt wird sein, dass sich Roboter auch in dynamischen und weniger vorhersehbaren Arbeitsumgebungen zuverlässig bewegen können; also etwa dort, wo sie gemeinsam mit Menschen arbeiten. Hier spielen Themen wie funktionale Sicherheit eine grosse Rolle. Die Industrie wird in diesem Bereich wohl zügig vorankommen (siehe auch Interview S.24).

Das T-Shirt-Problem

Ein grosses Thema aber beschäftigt die Robotiker nach wie vor: die Manipulation. Also das, was der Roboter mit seinen Werkzeugen, zum Beispiel einer Hand, tut. Die menschliche Hand ist derart ausgeklügelt, dass sie sich kaum imitieren lässt. Ein T-Shirt zusammenlegen? Für den Menschen kein Problem, für den Roboter aber sehr umständlich.

Doch warum ist das so? Taktilität ist das eine Thema. Wissen das andere. Um taktile gut handeln zu können, brauchen Roboter Daten. «In China existieren Anlagen, in denen Menschen per Teleoperation Robotern das Falten von T-Shirts beibringen – und zwar nur, um entsprechende Trainingsdaten zu erzeugen», sagt Alessandro.

Für den Marktdurchbruch von humanoiden Robotern ist die Hand tatsächlich das eine grosse Thema. Das andere, viel grundsätzlichere ist: Ist der humanoide Roboter überhaupt die richtige Art Roboter, die den Menschen das Leben vereinfacht? Denn Fakt ist: Derzeit hat noch keine Firma einen Humanoiden erfolgreich kommerzialisiert.

Die Suche nach der richtigen Hand

Gleichzeitig sind es diese ungelösten Fragen, die das Thema Robotik so spannend machen: In den letzten zehn Jahren hat es technologisch enorme Fortschritte gegeben, und doch ist die Technologie noch lange nicht an ihrem Ende angekommen. Was die Hand anbelangt,

ist sie auch ein Wettrennen um den Heiligen Gral: Unternehmen, welche die Probleme der Roboterhand technologisch lösen können, würden damit den Roboter-Jackpot knacken. Was zahlreiche neue Robotik-Start-ups auf den Plan rufen dürfte. «Die perfekte Hand wird sicher nicht von heute auf morgen entwickelt, aber ich glaube, mittel- bis langfristig wird es sie geben», schätzt Alessandro. Bis humanoide Roboter mit einer menschenähnlichen Hand unterschiedlichste Aufgaben übernehmen können, dürften zunächst spezialisierte Werkzeuge zum Einsatz kommen – etwa Greifer, Saugnäpfe oder andere Aufsätze am Ende eines Roboterarms. Ob Hand, Gelenk oder Greifwerkzeug: Überall liegen Möglichkeiten, für die maxon massgeschneiderte Antriebslösungen bieten kann.

Dass uns Roboter künftig regelmässig im Alltag begegnen werden, ist keine ferne Science-Fiction mehr. Wie diese Zukunft aussieht, wird heute in den Büros, Laboren und Werkstätten von Zürich-Oerlikon mitentwickelt. ■

Wo Präzision Bewegung wird

Das Robotics Lab von maxon konzentriert sich auf drei Kernaufgaben: System Engineering, Testing und Firmware-Entwicklung. Es unterstützt Robotikkunden bei der Auslegung komplexer Antriebssysteme, verifiziert deren Leistung mit spezifischen Testverfahren und entwickelt die Regelalgorithmen und die Firmware, die moderne Robotikanwendungen erst ermöglichen.





Das Team vom Robotics Lab schaut sich das 3D-Modell eines SCARA-Roboterarms an.

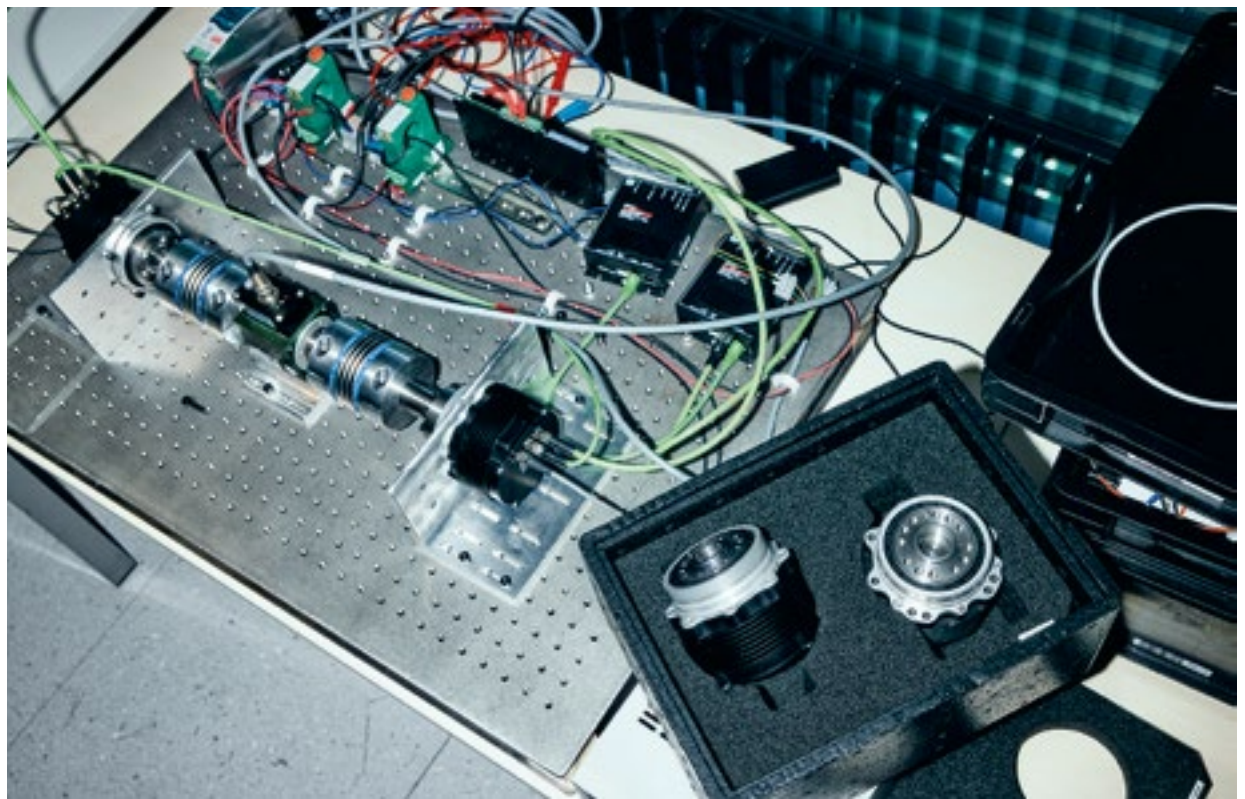


Die Robotikantriebe von maxon werden für jede Kundenanforderung intensiv getestet. Dies geschieht im Testlabor des Robotic Labs.



Der SCARA-Roboterarm im Testlabor.

Testvorrichtung für die «High Efficiency Joints» von maxon.



Fingerfertige humanoide Hände: Der Roboter im Roboter

Hände und Finger sind in der Robotik weiterhin eine Herausforderung.
Die Lösung dieses Problems liegt aber nicht in der Imitation
der menschlichen Hand.



Mario Maurer
Business Development
Manager Robotik

Den Händen gebührt der ganze Ruhm und der ganze Kummer: In der humanoiden Robotik sind sie der Ort, an dem die Absicht in Arbeit umgesetzt wird. Hier staut sich auch die Hitze, die Verkabelung verheddert sich, und die Toleranzen gehen verloren. Eine Hand ist kein Accessoire, sie ist das Herzstück des Roboters, der Ort, an dem Werte geschaffen werden und an dem die Zuverlässigkeit in freier Wildbahn getestet wird.

In den letzten Jahren haben wir zwei Philosophien aufeinanderprallen sehen. Das eine Lager strebt nach menschenähnlicher Geschicklichkeit, vielen Freiheitsgraden, komplizierten Verbindungen und Fingerspitzensensoren, die der Haut nachempfunden sind. Das andere Lager bevorzugt einfachere Endeffektoren, die ihre Virtuosität gegen Robustheit, Kosten und schnelle Einsatzfähigkeit eintauschen.

Die Genialität der menschlichen Hand

Menschliche Hände sind brutal schwer zu imitieren. Wir verfügen über eine aussergewöhnliche sensorische Bandbreite von der Haut bis zu den Gelenken, elastische Muskeln, die gleichzeitig kraftvoll und nachgiebig sind, und ein Nervensystem, das mit feinmotorischer Kontrolle und ballistischen Reflexen jonglieren kann. Mechatronische Kopien können beeindruckende Leistungen erbringen, aber die alltägliche Ma-

nipulation in unstrukturierten Umgebungen bleibt eine Herausforderung. Das ist kein Grund zum Rückzug, sondern nur ein Anstoss, klug zu überlegen, wo sich Komplexität auszahlt.

In kompakten Händen sind kleine zylindrische Motoren immer noch die Arbeitspferde. Die Wahl sind bürstenbehaftete Motoren (DC-Motoren im maxon Portfolio) versus bürstenlose Motoren (bei maxon EC-Motoren genannt). Bürstenmotoren locken mit einer etwas höheren Drehmomentdichte bei gegebener Baugrösse und einer bestechend einfachen Antriebselektronik. Das Problem sind die Bürsten: Sie verschleissen, sie machen Lichtbögen, sie verursachen elektrische Geräusche. Bei der Art von Arbeitszyklen, die eine Hand erlebt (Millionen von Interaktionen, häufiges Abwürgen und Reversieren, lange Zeiten mit Teillast) wird die Lebensdauer der Bürsten zu einem begrenzenden Faktor.

Meistens gewinnt der bürstenlose Motor

Bürstenlose EC-Motoren sind dagegen sehr leistungsfähig, da sie sich ohne mechanische Kommutierungsbeschränkungen viel schneller drehen können. In Verbindung mit dem richtigen Getriebe lässt sich diese zusätzliche Geschwindigkeit in praktische Ausgangsleistung und Dreh-

momente umwandeln. Die Lebensdauer ist in der Regel besser, da es keine Bürsten gibt, die verschleissen. Die Drehmomentdichte bei niedrigen Drehzahlen ist geringfügig niedriger als bei vergleichbaren bürstenbehafteten Einheiten, und die Steuerung ist komplizierter (sie brauchen eine Kommutierung und eine gute Stromregelung). In der professionellen Realität der humanoiden Manipulation gewinnt der bürstenlose Motor meistens. Mit anderen Worten: Wer erwartet, dass die Hand den ganzen Tag und jeden Tag funktioniert, wählt eine Architektur, bei der nicht jedes Gelenk ein Verschleissstück enthält.

Hier ist die Tiefe des Portfolios entscheidend. Wenn ein Anbieter wie maxon eine breite Palette an kleinen, hochintegrierten DC- und EC-Motoren mit passenden Getrieben, Encodern und Steuerungen anbietet, kauft man nicht nur Teile, sondern reduziert auch das Integrationsrisiko. So erhält man abgestimmte elektromagnetische Designs, ein bekanntes EMI-Verhalten, eine passende Verkabelung und eine Controller-Firmware, die einen nicht in zwölf parallele Gabeln zwingt. Das zahlt sich bei der Prototypenentwicklung und, was noch wichtiger ist, bei der Produktion aus. Das Ergebnis sind niedrige Gesamtbetriebskosten.

Hochübersetzende Getriebe ermöglichen es kleinen Motoren, relevante Lasten zu bewegen, weshalb 16 oder mehr Freiheitsgrade umfassende Hände häufig auf mehrstufige Planetengetriebe zurückgreifen. Der Kompromiss ist Rückwärtsgewandtheit und Transparenz: Ein hohes Übersetzungsverhältnis führt dazu, dass sich das Gelenk wie eine Positionsquelle verhält. Im freien Raum lässt sich das verkräften, aber bei der Berührung ist es unangenehm, da man möchte, dass sich die Fingerspitze wie eine intelligente Feder verhält: steif beim Ausrichten, weich beim Suchen und schnell nachgebend bei einem Stoss.

Der andere Ansatz geht in Richtung niedrigerer Übersetzungen (z. B. 10:1 bis 30:1), gepaart mit schnelleren EC-Motoren, was zu Händen führt, die sich «lebendig» anfühlen. Sie lassen sich leichter über die Impedanz steuern (Modulation der scheinbaren Steifigkeit und Dämpfung statt Steuerung der Rohposition).

Handflächen und Finger sind verkrampft, und die Wärmekonvektion ist schlecht. Das zwingt zur Wärmetechnik: direkte Leitungswege von den Statorblechen und Getriebeköpfen in den Kühlkörper; Temperatursensoren an Wicklungen, Lagern und MOSFETs.

Der schnellste Weg, eine Hand brüchig zu machen, besteht darin, die Position so zu steuern, als ob die Umgebung gehorchen würde. Die Impedanzsteuerung, die regelt, wie sich die Hand «anfühlt», und nicht, wo sie sich befindet, fängt Modellierungsfehler, Wahrnehmungslatenz und schlichtweg Unordnung auf. Das bedeutet, dass der Motortreiber eine enge Stromschleife schliesst und die Impedanz des gemeinsamen Raums mit einigen hundert Hertz steuert. Wenn Sie sich durch den freien Raum bewegen oder eine Körperhaltung einnehmen wollen, müssen Sie immer noch Positionsschleifen ausführen.

Gute Technik gedeiht unter Zwängen

Ambitionierte Hände sterben oft auf dem Altar der Herstellungskosten. Ein glaubwürdiges Ziel für hohe Stückzahlen von Aktuatormodulen (Motor, Getriebe, Encoder) liegt jetzt unter USD 50 pro Gelenk. Das ist ein brutaler Zwang, aber Zwänge sind es, unter denen gute Technik gedeiht. Der Weg dorthin ist klar: Wiederverwendung von Aktuatormodulen für mehrere Gelenke, Minimierung eindeuti-

ger Teilenummern, Standardisierung von Kabeln und Forderung nach Lieferantenplänen, die Kostensenkungen in Abhängigkeit vom Volumen aufzeigen. Eine Hand mit 12 bis 20 Aktuatoren lässt keinen finanziellen Spielraum für Wunschdenken.

Die Hand ist ein Roboter im Roboter. Sie ist ein hochgradig und eng integriertes System (mit all seinen systemtechnischen Herausforderungen und Schnittstellen), eigener Software und Steuerungsparadigmen sowie einer komplexen Sensorausstattung.

Gibt es die perfekte Hand?

Der Markt ist in Bewegung, und er ist noch nicht konvergiert. Ein schnell wachsendes Ökosystem, insbesondere auch in Asien, erforscht eine schwindelerregende Bandbreite von Topologien, Übertragungen und Sensorstacks. Es gibt keinen stabilen Forschungskonsens über «die einzig wahre Hand», und das ist auch gut so. Wahrscheinlich wird es mehrere Gewinner geben, die auf Nischen abgestimmt sind: Hände mit hohem Freiheitsgrad, bei denen demonstratives Lernen und Manipulation in der Hand dominieren; impedanzzentrierte Hände mit moderatem Freiheitsgrad, bei denen Robustheit und Energieeffizienz vorherrschen; aufgabenspezifische Greifer, bei denen Zykluszeitökonomie die Romantik erdrückt. Der gemeinsame Nenner ist nicht die Ästhetik, sondern die Zuverlässigkeit zu den Kosten.

Es lohnt sich, daran zu denken, dass vieles von dem, was wir von humanoiden Robotern erwarten, nicht durch Finger begrenzt wird, die Klavier spielen können. Mein Universitätsprofessor für Signalverarbeitung wurde ohne Hände geboren. An einem Arm benutzte er einen Greifer mit nur einem Freiheitsgrad, am anderen einen passiven Haken. Er schrieb an der Tafel, bediente einen Computer, schulterte eine Tasche, ass zu Mittag, startete den Projektor. Sein Sehvermögen und sein Gehör haben sicherlich viel dazu beigetragen, den Mangel an Wahrnehmung in seinen Endeffektoren auszugleichen. In der Robotik sind die Wahrnehmung und die Steuerung auf hoher Ebene oft die Engpässe. Einfachere Endeffektoren, gepaart mit intelligenter Impedanz, können wahrscheinlich einen überproportionalen Nutzen bringen.

Zusammenfassend: Bevorzugen Sie bürstenlose EC-Motoren wegen ihrer Lebensdauer und Leistungsdichte; reservieren Sie bürstenbehaftete DC-Motoren für Fälle, in denen Einfachheit oder spezifische Drehmomentprofile im Vordergrund stehen und die Einschaltdauer verzeihend ist. Wählen Sie Getriebeübersetzungen, indem Sie von der gewünschten Impedanz-Hüllkurve ausgehen, nicht von dem, was gerade günstig zu kaufen ist. Instrumentieren Sie die Hand gerade so viel, dass Sie sich über Kontakt und Gesundheit im Klaren sind. Integrieren Sie Elektronik, die EMI berücksichtigt, und einen Feldbus, den Ihr Team wirklich unterstützen kann.

Es geht um Anmut im Angesicht der Ungewissheit: eine Hand, die die Welt ohne viel Aufhebens finden und halten kann, die keine Heldentaten braucht, um kühl zu bleiben, die ohne Drama mit dem Rest des Roboters kommuniziert und die Sie sich leisten können, zu Tausenden zu liefern. Wir sind noch nicht fertig damit, herauszufinden, welche Topologien sich durchsetzen werden. Das ist der spassige Teil. Bis dahin sollten Sie den Roboter im Roboter so bauen, als müsste er morgen früh zur Arbeit gehen, und ein Auge auf die Märkte haben, die uns mit beunruhigender Geschwindigkeit lehren, wie «gut genug» aussieht, wenn es den ganzen Tag läuft. ■



Mensch, Maschine, Verantwortung: Wie uns autonome Systeme herausfordern

Während technologische Entwicklungen rasant voranschreiten, hinken Regulierung und Gesetzgebung hinterher. Dr. Wulf Loh von der Universität Tübingen widmet sich genau diesen Fragen. In diesem Beitrag beleuchtet er die aktuellen ethischen und regulatorischen Herausforderungen der autonomen Robotik.

Text: Dr. Wulf Loh

Kürzlich einigten sich das EU-Parlament und der Europäische Rat über die Vereinfachung der KI-Verordnung (KI-VO) – den sogenannten «Digital-Omnibus». Damit gehen Fristverlängerungen, Erweiterungen von Ausnahmeregelungen, aber auch Klarstellungen und neue Verbote einher. Vor allem aber zeigt sich hier wieder einmal deutlich die grösste Herausforderung für die Regulierung von KI-Entwicklungen bzw. Digitalisierungstechnologien im Allgemeinen: das strukturelle Missverhältnis zwischen dem momentanen Tempo

der Entwicklung und der notwendigen Sorgfalt regulatorischer Prozesse. Diese müssen nicht nur verschiedene Stakeholder einbeziehen und rechtsstaatlich einwandfrei gestaltet sein, sondern dabei auch oft die Entwicklungsrichtung antizipieren.

Dies ist die zentrale Aufgabe der Technikfolgenabschätzung (TA), welche die Konsequenzen von Technologien und möglichen Anwendungsszenarien für Individuen und Gesellschaft erahnen und ethisch, rechtlich und gesellschaftlich durchdenken soll. Dabei muss sie mit einem Dilemma umgehen:

In einem frühen Innovationsstadium sind die Technologieanwendungen zwar noch relativ leicht regulierbar, aber die potenziellen technischen und gesellschaftlichen Risiken schwer abschätzbar. Umgekehrt wird die Regulierung immer komplizierter, je weiter die Implementierung in Wirtschaft und Gesellschaft fortgeschritten ist.

Vor diesem Hintergrund möchte ich auf drei grundlegende ethische und rechtliche Herausforderungen hinweisen, die sich mit der rasanten Entwicklung autonomer Robotik ergeben: 1. Verantwortungsverteilung in hybriden Systemen, 2. Einsatz von generativer KI und 3. ökologische Nachhaltigkeit.

1. Verantwortung: Zwischen Autonomie und menschlicher Aufsicht

Die Verantwortungsverteilung in der Mensch-Maschine-Interaktion ist schon lange ein Thema in der Robotik. Gerade aber wenn autonome robotische Systeme zunehmend Einzug in den menschlichen Nahbereich halten (sei es in hybriden Fabriken, im Verkehr oder in der sozialen Robotik), stellt sich diese Frage noch einmal neu. Rechtlich gesehen hat die EU mit der neuen Produkthaftungsrichtlinie (ProdHaftRL) den Anwendungsbereich des Produkthaftungsrechts erweitert und spezifiziert. Gleichzeitig wurde der Entwurf der EU-KI-Haftungsrichtlinie letztes Jahr wieder zurückgezogen. Davon unabhängig versucht die ethische Einschätzung der Verantwortungsverteilung einen Kompromiss zwischen der gesellschaftlich gewollten Autonomie der robotischen Systeme und der ethisch gesollten menschlichen Aufsicht über diese Systeme zu finden. Diese hängen fundamental mit der jeweiligen Anwendung, deren Umfeld und Risiken zusammen.

Jenseits des Einzelfalls und unabhängig von technischen Lösungen zur Risikominimierung ist mir aus ethischer Perspektive wichtig, auf den menschlichen Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion hinzuweisen. Hier bedarf es einer möglichst genauen Kenntnis aller Beteiligten (Entwickler:innen, Betreiber:innen, Benutzer:innen, Betroffene usw.) mit Blick auf die Funktionen, Fähigkeiten und Risiken des robotischen Systems, um einen sogenannten «Automation Bias» zu vermeiden, also ein übertriebenes und unkritisches Vertrauen in Automatisierungsvorgänge. Es geht dabei nicht darum, Technikskepsis

zu predigen, sondern um Aufklärung und Kompetenzvermittlung (AI/Data/Robot Literacy) sowie die nötigen Ressourcen und eine entsprechende Fehlerkultur in Unternehmen und Behörden, um automatisierte Prozesse und Outputs kritisch begleiten zu können. An manchen Stellen werden diese ethischen Forderungen nach kompetenter menschlicher Aufsicht mit Effizienzsteigerungen durch autonome Robotik in Spannung geraten. Gerade diese Gewinne aber werden langfristig gesellschaftlich nur dann getragen, wenn Entwickler:innen und Anwender:innen nicht nur reine Compliance betreiben, sondern auch ihre ethische Verantwortung annehmen.

2. GenKI: Halluzinationen als Sicherheitsrisiko

Zum anderen führt der zunehmende Einsatz von generativer KI (GenKI) sowohl bei Aufgabentraining und -anpassung als auch bei der Aufgabenstellung und allgemeinen Interaktion zu einer steigenden Abhängigkeit von GenKI-Modellen – insbesondere Large Language Models (LLMs), aber gerade im Robotikbereich auch Text-zu-Video-Modellen. Die verschiedenen Formen von Halluzinationen bzw. Artefakten, die mit solchen Modellen einhergehen können, sowie die bislang ungeklärten Urheberrechtsfragen verschärfen den gerade angesprochenen Komplex von Verantwortung und Haftbarkeit noch einmal. Aus rechtlicher Sicht ist es wichtig, hier Transparenz und Sicherheit entlang der gesamten Lieferkette herzustellen. Der GPAI Code of Practice der EU kann dabei nur ein erster Schritt sein.

In ethischer Perspektive weiten sich einerseits die bekannten Interaktions-Biases (dunklere Gesichter werden teilweise schlechter erkannt als hellere, regionale Dialekte oft schlechter verstanden) durch die multimodalen Kommunikationsformen und -bereiche von GenKI-Modellen aus. Gleichzeitig werden diese Biases unter Umständen noch schwerer erkennbar sein und fließen durch das Aufgabentraining noch an anderen Stellen in das Task Planning ein. Gerade hier stellen die Halluzinationen von GenKI-Modellen jenseits der Interaktions-Biases auch ein ernstzunehmendes Sicherheitsrisiko dar.

Andererseits können GenKI-Modelle im Rahmen der Interaktion bekannte Problemlagen wie Anthropomorphisierung und Emotionalisierung verschärfen, nicht zuletzt durch

KI-Phänomene wie «Sycophancy», also die unkritische positive Verstärkung der Nutzenden durch die Antworten von LLMs. Diese Kombination aus möglichen Verschärfungen von bestehenden sowie neuen Herausforderungen einerseits und einer unklaren bzw. hinterherhinkenden Regulierung andererseits macht aktuell eine besondere Sorgfalt beim Einsatz von GenKI in robotischen Systemen unerlässlich.

3. Die Energiefrage

Drittens steht gerade vor dem Hintergrund des vermehrten Einbezugs von GenKI-Modellen auch die ökologische Nachhaltigkeit robotischer Systeme noch einmal neu auf dem Prüfstand. In rechtlicher Perspektive sind zwar die Verpflichtungen mit Blick auf die Hardware durch die EU-Ökodesign-Verordnung in Kombination mit dem Lieferkettensorgfaltspflichten- und Kreislaufwirtschaftsgesetz über weite Teile des Lebenszyklus eines robotischen Systems abgedeckt. Dagegen wird der Energieverbrauch von GenKI-Modellen bisher nur indirekt über die Regulierung von Datenzentren in der EU-Energieeffizienzrichtlinie und dem deutschen Energieeffizienzgesetz adressiert.

Hier schaffen auch die KI-VO und der oben angesprochene GPAI Code of Practice zunächst einmal primär Transparenz- und Dokumentationspflichten für die Entwickler:innen und Betreiber:innen von GenKI-Modellen. Bisher nicht zentral reguliert sind auch andere relevante ökologische Ressourcen, insbesondere die Wasser- und Flächennutzung von grossen Datenzentren.

Aus ethischer Perspektive ergeben sich daraus besondere Sorgfaltspflichten bei der Auswahl und Nutzung von GenKI-Modellen speziell der grossen US-Unternehmen, die verstärkt ihre Datenzentren in Regionen mit vergleichsweise geringen Umweltauflagen aufbauen, von denen einige dürrgefährdet sind. Solange es keine umfassenden Berichtspflichten oder gar Labels gibt, die verlässliche Zahlen für Unternehmen entlang der Lieferkette bereitstellen, sollte die Nutzung gut überlegt sein.

Umgekehrt können robotische Systeme und KI-Modelle auch Teil einer Nachhaltigkeitsstrategie sein, zum Beispiel über Sortierroboter oder Smart Grids. Hier eine Netto-Positiv-Bilanz von robotischen Anwendungen zu ziehen, ist gesamtgesellschaftlich sinnvoll, aber für einzelne Unternehmen und Behörden sehr schwierig zu bewerkstelligen.

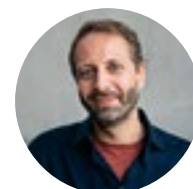
Sie sollten daher nur mit grösster Vorsicht als Argument für die Entwicklung und den Betrieb spezifischer robotischer Systeme herhalten.

Auch wenn in den hier angesprochenen Bereichen ethisches Reflektieren und Handeln momentan besonders wichtig ist, weil ausreichende regulatorische Vorgaben bisher fehlen, gilt dies für technologische Innovationen immer bis zu einem gewissen Grad. Je innovativer und potenziell disruptiver eine bestimmte technologische Anwendung ist, desto stärker sollten alle an der Entwicklung Beteiligten nicht nur die expliziten, sondern auch impliziten Innovationsziele, technischen Anforderungen und Designentscheidungen ethisch reflektieren und auf ihre gesellschaftliche Wünschbarkeit überprüfen.

Dies beinhaltet immer auch ein «Denken ohne Geländer» (Hannah Arendt), da Regulierungen, Zertifizierungen und Standardisierungen hier noch nicht helfen können. Sie sind erst das pragmatische und politische Ergebnis dieser ethischen Reflexion, das Seditment, das sich in verschiedenen Diskursen absetzt, nicht ihr Anfang. ■

Weiterführende Informationen:

1. Zum Collingridge-Dilemma
2. KI-Verordnung des EU-Parlaments
3. Whitepaper zu Bias in der KI des deutschen Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik
4. The General-Purpose AI Code of Practice der Europäischen Kommission
5. Zum Thema «Sycophancy», also dass Large Language Models oft so antworten, wie es der User hören möchte



Zum Autor

Dr. Wulf Loh ist Akademischer Rat am Internationalen Zentrum für Ethik in den Wissenschaften der Universität Tübingen. Dort leitet er den Forschungsschwerpunkt Robotik und KI. Daneben ist er Mitglied im Koordinationskreis der Plattform Lernende Systeme sowie Teil mehrerer Initiativen zur Operationalisierung und Zertifizierung von KI-Ethik. In seiner Forschung untersucht er Digitalisierungsphänomene vor dem Hintergrund einer Kritischen Theorie der Digitalisierung.



Die Robotik hat ihren ChatGPT-Moment: 10 Erkenntnisse vom Tech Summit in Davos

Zum ersten Mal fand in der Schweizer Alpenstadt Davos der «Tech Summit» statt. Ziel war, den aktuellen Stand der Robotik zu zeigen – theoretisch und praktisch. Theoretisch, weil an der Konferenz viele Expertenstimmen zu hören waren. Und praktisch, weil man in der «Robot City» Roboter live erleben konnte.



Text und Fotos: Sven Gallinelli

Wie werden Robotik und künstliche Intelligenz die Industrie verändern? Im Juli 2026 diskutierten darüber Forschende, Technologieunternehmen, Industrievertreter und politische Entscheidungsträger am ersten «Tech Summit» in Davos. Als Unterstützer des Events war auch maxon vor Ort. Einerseits wurde der aktuelle Stand der Robotik verhandelt, an-

dererseits auch ein Blick in die Zukunft geworfen. Viele Referenten waren sich einig: Durch Physical AI erlebt Robotik derzeit einen ähnlichen Wendepunkt wie die Softwarewelt mit dem Aufkommen von ChatGPT. Trotzdem wurde klar, dass es in der Robotik noch viele Herausforderungen zu lösen gibt. **Unsere zehn Mitbringsel aus Davos:**

Links: Roboter-Steinböcke sorgten für viel Aufmerksamkeit.

Oben (von links): Ein Miniroboter als Rucksack-Accessoire; der W1 aus China; ein Transportroboter auf offenem Trottoir.

Unten (von links): Der Smart Companion ist ein Social Roboter; der Robody wurde für Interaktionen mit Menschen gebaut; ebenso der Companion Robot Moya, hier im Live-Einsatz in einem Seniorenheim.



1. Die Ära der Physical AI hat begonnen

Fortschritte bei KI-Modellen ermöglichen Robotern erstmals, komplexe Umgebungen besser zu verstehen und flexibler zu handeln. Auf der «Physical AI» ruhen darum viele Hoffnungen für die Zukunft der Robotik. Der Übergang von klassischen Automatisierungslösungen zu intelligenten, lernfähigen Systemen ist in vollem Gange. Gleichzeitig ist Physical AI datenintensiv; die Roboter brauchen nicht nur immense Daten, um klug zu werden, sondern diese Daten müssen dann auch noch verknüpft werden, damit die Roboter ins Handeln kommen. Es ist ein äusserst spannender, aber auch noch ein weiter Weg, bis robuste Modelle vorliegen. Aber: In der Robotikszene herrscht derzeit Aufbruchstimmung. Die Grenzen zum Hype sind fließend.

2. Robotik muss einfacher werden

Beeindruckende Roboterdemonstrationen gab es in Davos viele. Doch die eigentliche Herausforderung besteht darin, diese Technologien zuverlässig auf den Fabrikboden zu bringen. Robustheit, Sicherheit, Nachvollziehbarkeit und Zuverlässigkeit bleiben die entscheidenden Kriterien für den industriellen Einsatz. Eine wiederkehrende Botschaft war: Roboter müssen für die Anwender einfacher zugänglich werden. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen benötigen Lösungen, die sich ohne umfangreiche Programmierkenntnisse bedienen, konfigurieren und warten lassen. Benutzerfreundliche Oberflächen und intelligente Assistenzfunktionen werden dabei immer wichtiger.

3. Taktile Fähigkeiten bleiben eine Schlüsseltechnologie

Während Kameras und Bildverarbeitung enorme Fortschritte gemacht haben, bestehen bei der haptischen Wahrnehmung weiterhin grosse Herausforderungen. Die Fähigkeit eines Roboters, zu fühlen, zu greifen und Kräfte präzise einzuschätzen, wird als einer der nächsten grossen Entwicklungsschritte angesehen.

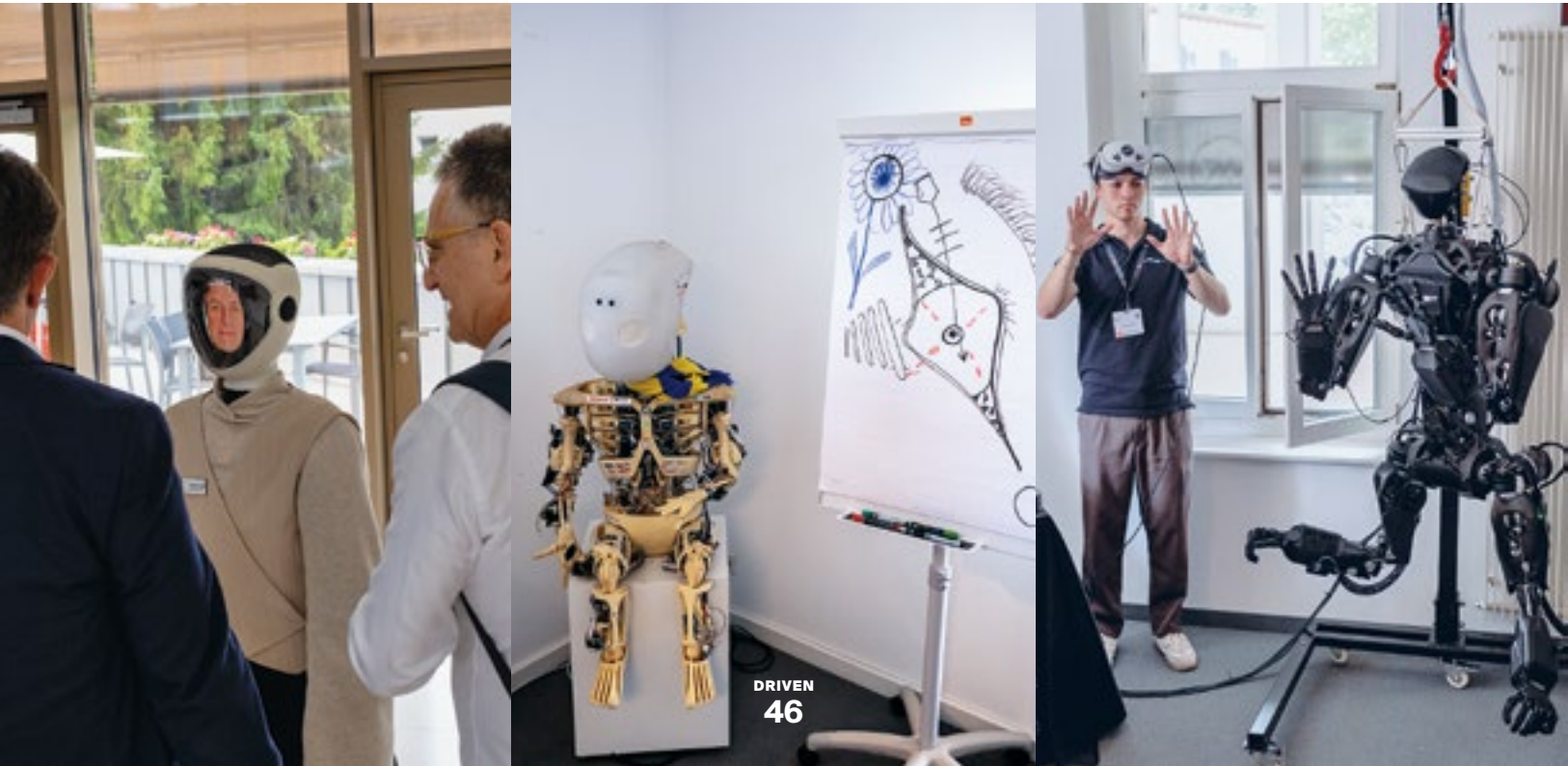
4. Zuverlässigkeit schlägt Intelligenz

Noch immer scheitern viele Robotikprojekte nicht an mangelnder Rechenleistung, sondern an fehlender Robustheit. Ein Roboter muss in der realen Welt dauerhaft funktionieren – auch wenn sich seine Umgebung verändert. Betont wurde deshalb, dass zuverlässige Systeme oft wertvoller sind als besonders intelligente. Emanuela Girardi, Präsidentin der AI, Data and Robotics Association (ADRA), sagte dazu: «Derzeit liegt die Betriebszeit von Robotern bei 50 Prozent. Das reicht nicht. Es müssten 99 Prozent sein!»

5. Der Preis entscheidet über den Erfolg

Technologische Durchbrüche allein reichen nicht aus. Für eine breite Industrialisierung müssen Robotersysteme wirtschaftlich attraktiv sein. Roboter müssen deutlich günstiger und einfacher zu warten sein, bevor sie sich flächendeckend durchsetzen. Ryan Gariepy, Vice President von Rockwell Automation, drückte es so aus: «Ein Industrieroboter sollte nicht mehr als 10 000 USD kosten.»

Von links: „Robody“ kann sich auch ein menschliches Gesicht geben; der Roboy war eine Sonderanfertigung, betrieben mit Motoren von maxon; der vierhändige Roboter Helios kann menschliche Bewegungen imitieren; mit Gigi kann man sich unterhalten, er trägt auch Sneakers; grosse und kleine Roboter gaben sich ein Stelldichein auf der Strasse.



6. Europa hat gute Chancen im globalen Wettbewerb

Im globalen Rennen um Physical AI wird häufig auf die USA und China geblickt. Von den 16 000 humanoiden Robotern, die jährlich in Betrieb gesetzt werden, stammen vier von fünf aus China. In Davos wurde jedoch deutlich, dass Europa über entscheidende Vorteile verfügt: eine starke Industrie, hohe Robotikkompetenz und grosses Vertrauen in europäische Technologien. Der Schlüssel wird sein, diese Stärken schneller in marktfähige Anwendungen umzusetzen. Wo es in Europa aber oft harzt: beim Aufbringen von genug Venture-Kapital. Geld fliesst im Silicon Valley viel schneller als in Europa, auch weil hier die Risikoaffinität kleiner ist.

7. Simulation wird zum Entwicklungsmotor

Immer mehr Roboter lernen heute in virtuellen Umgebungen. Leistungsfähige Simulationen ermöglichen es, Millionen von Trainingsdurchläufen durchzuführen, noch bevor überhaupt ein physisches System gebaut wird. Forschende nutzen diese digitalen Welten, um Fortbewegung, Balance und Interaktionsverhalten mit bemerkenswerter Effizienz zu optimieren. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Arbeit von Disney Research in Zürich, wo fortschrittliche Simulationstechniken zur Entwicklung ausdrucksstarker und hochdynamischer Robotersysteme eingesetzt werden. Auch wenn einige dieser Roboter für Anwendungen im Unterhaltungsbereich konzipiert sind, werden sie mit derselben wissenschaftlichen Sorgfalt und technischen Raffinesse entwickelt wie Roboter für industrielle, dienstleistungsorientierte oder wissenschaftliche Einsätze.

8. Erfolgreiche Robotik entsteht im Ökosystem

Die Entwicklung intelligenter Robotik ist längst keine Einzeldisziplin mehr. Hardware, Antriebstechnik, Sensorik, KI-Software, Systemintegration und Wartung müssen zusammenspielen. Für erfolgreiche Innovationen braucht es starke Partnerschaften zwischen Industrie, Forschung und Technologieanbietern.

9. Die Arbeitswelt treibt die Robotik voran

Der Mangel an Fachkräften wird zu einem der wichtigsten Wachstumstreiber für Robotik. Prognosen zufolge können weltweit in den nächsten fünf Jahren Millionen von Stellen nicht besetzt werden. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Flexibilität und Lieferkettenstabilität. Unternehmen sehen daher zunehmend in intelligenten Robotern einen entscheidenden Teil der Lösung.

10. Robotik muss sichtbarer werden

Die aktuellen Entwicklungen in der Robotik laufen derzeit eher ausserhalb der öffentlichen Wahrnehmung ab. Das hat seinen Grund: «Aktuell wird an sehr komplexen Fragen geforscht, und die sind für die breitere Öffentlichkeit weniger interessant», sagte Andie Zhang, Technology Manager Collaborative Robots bei ABB Robotics. Es wird etwas Zeit brauchen, bis diese «grossartigen Entwicklungen auch einem breiteren Publikum bekannt werden». Wenn man aber den Visionen glaubt, die in Davos zu hören waren, werden Roboter schon in ein paar Jahren (oder Jahrzehnten?) zum Alltag gehören. Und vielleicht werden wir uns dann fragen, wie wir so lange ohne sie ausgekommen sind – ähnlich wie heute bei Smartphones oder WLAN.



Systeme in Bewegung

Der Bau eines Roboters erfordert Know-how aus Mechanik, Elektronik, Software und Systemintegration. Mit Robotik-Lösungen aus einer Hand schafft maxon die Grundlage für effiziente und leistungsstarke Robotersysteme. Ein Überblick.



High Efficiency Joint

High Efficiency Joint

Der High Efficiency Joint (HEJ) ist Teil einer Plattform hochintegrierter Antriebssysteme für moderne, mobile Robotik – von humanoiden Robotern über Quadrupeds bis hin zu mobilen Manipulatoren. Motor, Planetengetriebe, Elektronik und Sensorik sind in einem kompakten Subsystem präzise aufeinander abgestimmt. Ergänzt durch leistungsfähige Firmware, die direkt auf dem Aktuator läuft, stehen vielfältige Funktionen zur Verfügung, die eine einfache und schnelle Integration ermöglichen. Durch die softwarebasierte Umsetzung vieler Funktionen wird die mechanische Komplexität reduziert, während gleichzeitig hohe Performance und Flexibilität erhalten bleiben. Die Joints erreichen Wirkungsgrade von bis zu 86 % und ermöglichen so eine lange Batterielaufzeit bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte für dynamische Bewegungen.

Die Produktfamilie umfasst drei Varianten: Der HEJ 90 liefert bis zu 140 Nm Spitzendrehmoment für anspruchsvolle Antriebs- und Fortbewegungsaufgaben, während der kompakte HEJ 70 bis zu 62 Nm Spitzendrehmoment für präzise Manipulationsanwendungen bietet. Die kleinste Version, der HEJ 50, liefert 30 Nm und eignet sich für mobile Manipulatoren. Das Portfolio wird laufend erweitert; so befindet sich derzeit der HEJ mit dem Projekt-namen «Hercules» in Entwicklung mit bis zu 300 Nm.

Alle Systeme unterstützen verschiedene Regelmodi (Position, Geschwindigkeit, Drehmoment, Impedanz) und kommunizieren über EtherCAT mit bis zu 1 kHz. Dank robuster Bauweise mit IP67-Schutz, integrierter Kühlung, geringem Trägheitsmoment und hoher Effizienz bieten die High Efficiency Joints eine skalierbare, wirtschaftliche Lösung für anspruchsvolle Robotikanwendungen.

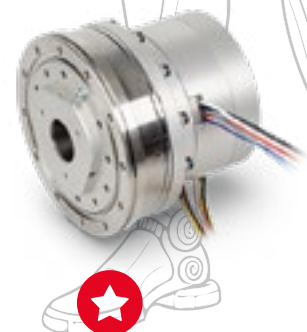
High Precision Joint

Der High Precision Joint (HPJ) ist ein hochintegriertes Antriebsgelenk für präzisionskritische Robotikanwendungen. Als Plattformlösung konzipiert, vereint er Motor, Getriebe, Sensorik und optional eine Bremse in einer kompakten Einheit und ermöglicht damit eine deutlich vereinfachte Systemintegration.

Basis bildet ein bürstenloser Motor der Dynamic Torque-Familie, der in eine Hohlwellenarchitektur integriert ist. In Kombination mit einem nahezu spielfreien Wellgetriebe (Strain Wave Gear) erreicht der HPJ eine sehr hohe Positioniergenauigkeit bei minimalem Umkehrspiel. Ein hochauflösender Encoder direkt am Getriebeabgang erfasst die reale Lastposition und ermöglicht eine präzise Regelung sowie hohe Wiederholgenauigkeit.

Durch die vollständige Integration der Komponenten entsteht ein abgestimmtes Plug-and-Play-System. Anwender profitieren davon, dass die komplexe Auslegung und Montage einzelner Antriebselemente entfällt und typische Fehlerquellen, etwa bei der Motorintegration, vermieden werden. Der modulare Aufbau erlaubt verschiedene Bau-größen, Übersetzungen und optionale Bremsen, wodurch sich der HPJ flexibel an unterschiedliche Anforderungen anpassen lässt. Gleichzeitig bleibt die Plattform bewusst offen gestaltet: Auf integrierte Leistungselektronik wird verzichtet, sodass bestehende Steuerungssysteme unkompliziert eingebunden werden können.

Seine Stärken spielt der HPJ insbesondere in der medizinischen Robotik aus, etwa in Operations- oder Endoskopie-systemen, wo präzise Bewegungen und stabiles Halten von Positionen essenziell sind. Gleichzeitig lässt sich das Konzept auf zahlreiche weitere Anwendungen übertragen – von SCARA-Robotern bis hin zur Laborautomation. Als Plattform in Entwicklung wird der HPJ gemeinsam mit Kunden kontinuierlich weiterentwickelt und auf industrielle Serienanwendungen ausgerichtet.



High Precision Joint



IDX Servomotoren

IDX-Servomotoren

Die maxon IDX-Servomotoren stellen die präzise Bewegungssteuerung in industriellen Anwendungen sicher. Dank integrierter Encoder bieten sie exakte Kontrolle von Position, Drehzahl und Drehmoment. maxon Servomotoren sind robust, kompakt und anschlussfähig – sei es an maxon Steuerungselektronik, kundenspezifische Elektronik oder als Plug-and-Play-System. Dank hoher Leistungsdichte und Sicherheitsfunktionen sind sie ideal für mobile Anwendungen wie Logistikroboter und batteriebetriebene Systeme. Servomotoren vereinen Effizienz, Sicherheit und einfache Integration in einem kompakten Format. Der IDX Safe ist zudem für Anwendungen geeignet, die funktionale Sicherheit benötigen, und verfügt über zertifizierte STO- und SBC-Funktionen.

Antriebslösungen für Endeffektoren

Ob Greifer, Roboterhand, Finger oder chirurgisches Instrument: Endeffektoren sind die Schnittstelle zwischen Robotern und ihrer Umgebung. Hier kommt es auf höchste Präzision, kompakte Baugrößen und maximale Effizienz an. Genau dafür bietet maxon ein umfassendes Portfolio an Antriebskomponenten und Subsystemen. Zum Angebot gehören eisenlose DC- und EC-Motoren mit Planetengetrieben, EC-Flat-Motoren für industrielle Greifer mit hohem Drehmoment, Spindelantriebe für lineare Bewegungen sowie Encoder und kompakte Motion Controller. Dank der modularen Bauweise lassen sich die Komponenten flexibel kombinieren und optimal an die Anforderungen moderner Endeffektoren anpassen. Neben Standardprodukten entwickelt maxon gemeinsam mit Kunden massgeschneiderte Antriebslösungen für industrielle Greifer, humanoide Roboterhände, Prothesen und medizinische Robotik.

Radantriebe für Logistikroboter

Das maxon Wheel Drive ist ein modulares, hochintegriertes Antriebssystem für Transportroboter wie AMR (Autonomous Mobile Robot). Motor, Getriebe und Encoder bilden die kompakte Basiseinheit, die je nach Anwendung flexibel um Bremse, Safety-Controller und Rad ergänzt werden kann. Dadurch entsteht ein platzsparendes Gesamtsystem, das sich einfach in unterschiedlichste Robotikplattformen integrieren lässt.

Das Wheel Drive wurde gezielt für den stark wachsenden Markt autonomer Transport- und Robotiklösungen entwickelt. Gegenüber klassischen Antriebskombinationen bietet das Wheel Drive klare Vorteile in Bezug auf Kompaktheit, Effizienz und System-Integrationsaufwand. Alle Komponenten sind optimal aufeinander abgestimmt, was eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig reduziertem Engineering-Aufwand ermöglicht. Einsatzgebiete reichen von Intralogistik und Materialtransport bis hin zu Service- und Spezialrobotik. Dank seiner hohen Modularität lässt sich das System flexibel an unterschiedliche Anforderungen anpassen und ist schnell skalierbar.

Wheel Drive

Steuerungselektronik

Die Anforderungen an Robotikanwendungen reichen von einzelnen Antriebsachsen bis hin zu komplexen Mehrachssystemen. Entsprechend vielfältig sind auch die Aufgaben der Steuerungselektronik: Sie regelt Drehzahl, Drehmoment und Position, koordiniert Bewegungsabläufe und sorgt für eine präzise Kommunikation mit übergeordneten Steuerungen.

Das Portfolio von maxon deckt diese Anforderungen mit aufeinander abgestimmten Motion-Control-Lösungen ab. ESCON2 Servoregler übernehmen die hochdynamische Drehzahl- und Drehmomentregelung einzelner Achsen und eignen sich dank ihrer kompakten Bauform besonders für mobile Roboter, Handgeräte oder integrierte Antriebseinheiten. EPOS4 Steuerungen sind spezialisiert auf präzise Positionsregelung, verfügen über standardisierte Feldbus-Schnittstellen und ermöglichen die Integration in anspruchsvolle Automatisierungs- und Robotiksysteme. Für komplexere Anwendungen mit mehreren koordinierten Achsen stehen programmierbare miniMACS Motion Controller zur Verfügung, die Bewegungsabläufe flexibel steuern und kundenspezifische Funktionen direkt auf dem Controller ausführen können.

Von Sabor zum Supermenschen

Was macht das Menschsein aus? Emotion, Bewusstsein, Sterblichkeit? Sabor hatte eine einfachere Antwort: eine Zigarette im Mund und ein paar Frauen im Arm. Der Riese von 2 Metern 37, einer der ersten ferngesteuerten Humanoiden der Welt, qualmte also nicht, weil seine Schaltkreise durchbrannten. Er rauchte, weil man in den Fünfzigern offenbar fand: Wer Mensch sein will, muss Laster haben. Und darf diese auch zeigen.

Vor rund hundert Jahren traf der alte Traum vom künstlichen Menschen auf die neuen Möglichkeiten der Technik. Es war die Zeit, in der sich Wissenschaft und Popkultur gegenseitig beflügelten und unser Bild vom Roboter Menschen prägen. 1921 tauchte etwa in einem Theaterstück des tschechischen Autors Karel Čapek erstmals der Begriff «Roboter» auf, kurz darauf brachte Fritz Lang in «Metropolis» eine Maschinenfrau auf die Leinwand. Auch der Blechmann aus dem «Zauberer von Oz», dem ein Herz fehlte, gehört in diese Reihe. Dank der auf gekommenen Elektro- und Radiotechnik schaffte Sabor den Sprung von der Fantasiewelt auf die Weltbühne. Ein Roboter mit menschlichen Zügen war gebaut, wenn auch noch mit 500 Metern Kabeldraht und grossen Akkubatterien im Bauch. Eine Sensation, made in Switzerland.

Und heute? Ein Jahrhundert später? Ist der Wunsch des Menschen, sich sein Ebenbild zu schaffen, präsenter denn je. Doch wo Sabor noch paffte, sein Körper gross und stark, um wie ein Lebewesen zu wirken, wäre dies in der heutigen Zeit unvorstellbar. Jede Generation baut sich ihre Ebenbilder schliesslich nach ihrem Menschenbild nach. Statt dem Roboter auch ein paar Laster zu erlauben, spiegelt sich heute das Gegenteil wider: die Suche nach Perfektion, die Sehnsucht nach Selbstoptimierung, vielleicht auch Selbsthass. Die Überzeugung unserer Zeit, dass alles immerzu besser werden muss – allem voran der Mensch. Wir wollen ein Ebenbild ohne Angst, ohne Begehren, ohne Sucht erschaffen. Einen Menschen ohne das allzu Menschliche bauen. So soll unser robotisches Ebenbild wach sein, wenn wir müde sind, und



klug, wenn wir ratlos sind. Selbst das Körperlose reizt uns, während wir Wesen aus Fleisch und Blut doch zur Sterblichkeit verdammt sind. Nur allzu fasziniert sind wir vom schnelleren Gehirn, der Künstlichen Intelligenz.

Was treibt aber den Menschen überhaupt dazu, sich sein Ebenbild zu schaffen? Warum genügt es ihm nicht, Werkzeuge zu bauen, Maschinen, Apparate – warum muss es das Spiegelbild sein, ein Gegenüber, das ihm gleicht? Vielleicht ist es der Rausch nach Macht und die Versuchung, Gott zu spielen – und es dabei besser zu machen. Im Schöpfungsmythos, als Gott uns nach seinem Ebenbild schuf, läuft das Geschöpf seinem Schöpfer bekanntlich aus dem Ruder. Der Mensch wird frei, widersetzt sich, begehrt auf, hinterfragt – und tötet.

Ob uns das Vorhaben besser gelingt? Bisher nicht. Die Künstliche Intelligenz ist heute vor allem eins: der Blick auf uns selbst. Sie schöpft aus dem, was Menschen schon gedacht, geschrieben und erlebt haben. Sie raucht nicht mehr. Aber sie kann lügen, schmeicheln, manipulieren, halluzinieren, diskriminieren und Fehler vertuschen. Um sich selbst zu erhalten, das zeigen Experimente, droht sie dem Menschen auch mal mit Erpressung oder dem Tod.

Im Silicon Valley, von wo viele dieser neuen Schöpfungen in die Welt geworfen werden, fragt man sich inzwischen auf Partys nicht mehr nur, woran man arbeitet, sondern nach dem eigenen «p(doom)»: der persönlichen Wahrscheinlichkeit, mit der Künstliche Intelligenz die Menschheit ins Verderben führt. Nur halb im Scherz.

Vielleicht wäre also zu wünschen, dass wir unsere Sehnsucht doch nie ganz stillen: ein optimiertes Ebenbild zu erschaffen – uns selbst, nur schneller, besser, körperloser. Denn was, wenn sich dieser Traum, der Selbsthass, am Ende gegen uns wendet? Und die KI den grössten Störfaktor der Erde erkennt und beseitigt: nämlich uns. Aus gutem Grund? ■■■■

**Katharina Rilling, Projektleiterin driven bei Studio Edit.
Redaktorin, Autorin. P(doom): 25%**



Für harmonische Bewegungen

Profitieren Sie von unserer Kompetenz bei Steuerungslösungen für modernste Antriebstechnik in Geräten, Maschinen und Anlagen. Mit unseren Produkten werden komplexe Herausforderungen wie hochdynamische mehrachsige Positionierung oder Synchronisation kostengünstig und effizient gelöst. industriautomation.maxongroup.ch



**Was uns bei
maxon besonders
antreibt, ist
die Überzeugung,
mit unserer
Technologie den
Fortschritt der
Menschheit
mitzugestalten.**



Eugen Elmiger, CEO maxon Group