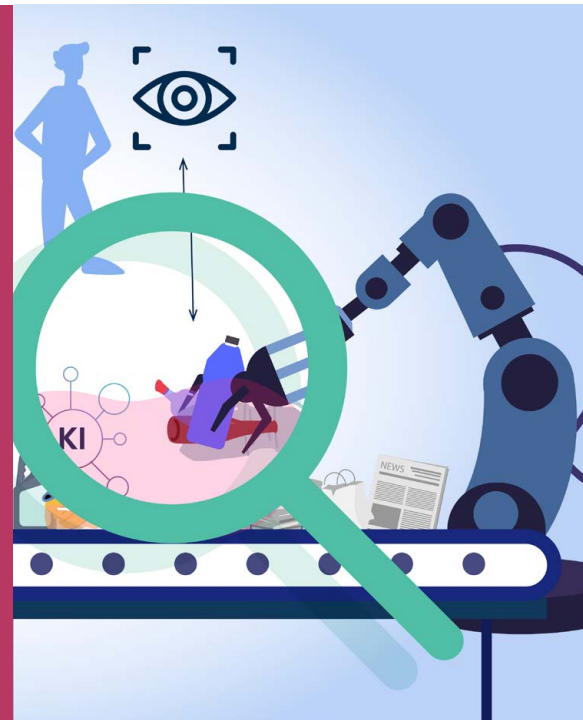


KI in der Robotik

Whitepaper

Beyerer, J., Kirchner, E. et al.
AG Lernfähige Robotiksysteme

Kurzfassung



Die Fähigkeit, Robotiksysteme einfach und intuitiv an Menschen, neue Aufgaben und Kontexte anzupassen, ist entscheidend, um das Potenzial dieser Technologie für die Bewältigung aktueller Herausforderungen unserer Zeit zu erschließen. Dies umfasst beispielsweise den Erhalt und Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit, die technologische Souveränität, den demografischen Wandel sowie den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft. Die rasante Entwicklung im Bereich des maschinellen Lernens der letzten Jahre, die sinkenden Kosten für Roboter und Komponenten sowie die steigende Rechenleistung führen zu einer optimistischen Aufbruchsstimmung in der Robotik. Die Realisierung von menschenähnlichen und adaptiven Anwendungen der Robotik in sozialen Umgebungen, die bisher nicht oder nur schwer umsetzbar waren, wird daher perspektivisch möglich sein, etwa im Dienstleistungsbereich, im Handwerk, im Alltag oder in der Pflege. Dennoch gilt es sicherheitsrelevante Herausforderungen zu adressieren, die die Entwicklung dieser Technologie begleiten. Denn trotz des Potenzials für Wirtschaft und Gesellschaft und des technologischen Möglichen bleibt die Gestaltung sicherer und zuverlässiger Roboter ein zentrales Thema, ebenso wie die Frage nach der Wirtschaftlichkeit.

Ausgangslage

Der technologische Fortschritt sowie die gesunkenen Kosten im Bereich der Robotik lassen ein hohes wirtschaftliches Potenzial erwarten. In der Kombination von Methoden der KI und der Robotik werden daher vielversprechende Entwicklungsmöglichkeiten gesehen,

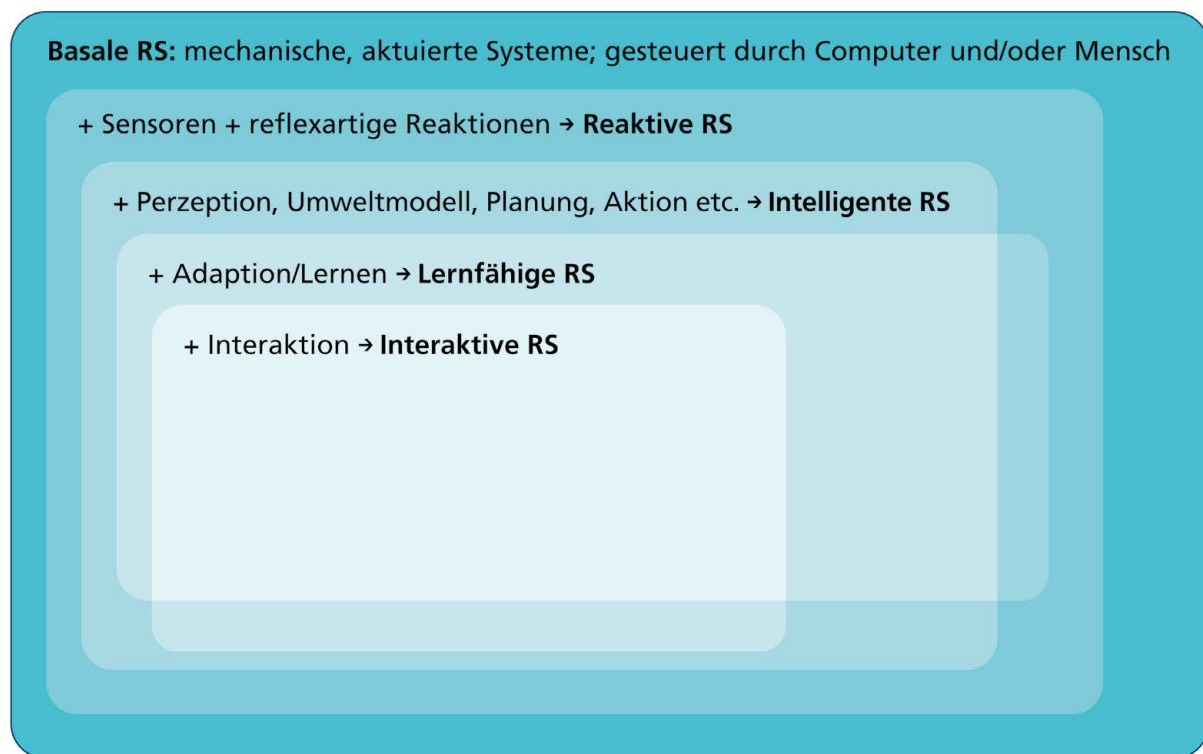
um Roboter flexibler zu gestalten und an sich ändernde Bedingungen anzupassen – verbunden mit einem wachsenden Marktpotenzial. Roboter, die sich durch Interaktion an unterschiedliche Aufgaben, Menschen und Umgebungen dank einfacherer Bedienung und Integration anpassen lassen und damit wenig Know-how auf Seiten der Anwendenden erfordern und zugleich Programmierkosten einsparen, eröffnen völlig neue Möglichkeiten und können ein Hebel sein, das ökonomische Potenzial besser auszuschöpfen und neue Geschäftsfelder zu erschließen. Denn mit ihrem breiten Spektrum an branchenübergreifenden Einsatzmöglichkeiten sind sie durch die Kombination mit KI-Technologien zunehmend in der Lage, sich in unstrukturierten, veränderlichen Umgebungen zurechtzufinden und anspruchsvollere Aufgaben zu übernehmen – dies, indem sie durch Interaktion lernen. Darüber hinaus wird Robotik als Schlüsseltechnologie zur Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen wie dem Fachkräftemangel und den Nachhaltigkeitszielen angesehen. Das Konzept des Lernens durch Interaktion in der Robotik stellt daher eine wichtige Weiterentwicklung dar: Denn, Interaktion, Simulation und Autonomie werden stärker zusammengedacht, sodass Roboter nicht nur durch KI zu intelligenten Robotiksystemen werden, sondern auch durch Interaktion weiter lernen können. Dieses Potenzial an der Schnittstelle zwischen Künstlicher Intelligenz (KI) und Robotik gilt es zu realisieren und diese Technologien zur Bewältigung der genannten Herausforderungen einzusetzen. Deutschland ist hierbei insgesamt gut aufgestellt, sieht sich aber sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch in der Anwendung der Robotik einer starken Konkurrenz aus Asien und den USA ausgesetzt. Daher müssen heute die Weichen gestellt werden, um einerseits technologisch nicht abgehängt zu werden und andererseits die Potenziale für Deutschland und Europa nutzen zu können.

Um die Weiterentwicklung und Umsetzung dieser Technologie in die Praxis voranzutreiben, bedarf es daher erstens der nötigen Motivation, die sich unter anderem aus gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen und damit verbundenen Zielen ergeben kann, zweitens der notwendigen Fähigkeiten (z. B. technologisches Know-how) und drittens der entsprechenden Gelegenheiten, die durch geeignete Maßnahmen sowie rechtliche, ethische und soziale Rahmung gestaltet werden müssen. Das Whitepaper fokussiert sich vor allem auf die technologischen Grundlagen sowie deren praktische Umsetzung, wobei nicht-technische Aspekte wie Regulierung und Wirtschaftlichkeit angesprochen, aber nicht vollständig behandelt werden.

Typologie von Robotiksystemen

Um das Konzept von lernfähigen und interaktiven Robotiksystemen einordnen zu können, werden zunächst die verschiedenen Typen von Robotiksystemen definiert; ausgehend von der Definition von Robotik nach Brady (1985), der Robotik als die intelligente Verbindung von Wahrnehmung und Handlung definiert. Um die graduellen Unterschiede von Robotersystemen mit zunehmendem Fähigkeitsspektrum lernfähiger Systeme zu veranschaulichen, wird ein Modell präsentiert, das Robotersysteme in aufeinander aufbauende Typen einteilt, wobei jeder weitere Typ die Fähigkeiten des vorhergehenden umfasst. Die einzelnen Typen (basal, reaktiv, intelligent, lernfähig, interaktiv) können sich teils auch überschneiden und sind daher nicht immer klar voneinander abzugrenzen.

Abbildung 1: Robotiksysteme (RS) – Ein grafischer Definitionsversuch



Quelle: Konzeption und grafische Übersicht nach Jürgen Beyerer.

Basale Robotiksysteme sind mechanische, aktuierte, durch Computer oder den Menschen gesteuerte Systeme, die auch mit Manipulatoren ausgestattet sein können (z.B. Greifer) und im Gegensatz zu Automaten (vgl. Getränkeautomat) für unterschiedliche Zwecke einsetzbar sind. Beispiel: Industrieroboter, die präzise und automatisiert Schweißnähte setzen, können durch Reprogrammierung und Ausstattung mit anderen Manipulatoren und/oder Werkzeugen Autofenster einsetzen (Multifunktionalität).

Reaktive Robotiksysteme reagieren reflexartig auf bestimmte Situationen basierend auf vordefinierten Regeln und nutzen einfache Sensorik. Beispiel: Ein Schweißroboter, der nur dann zu arbeiten beginnt, wenn ein Werkstück eine Lichtschranke passiert.

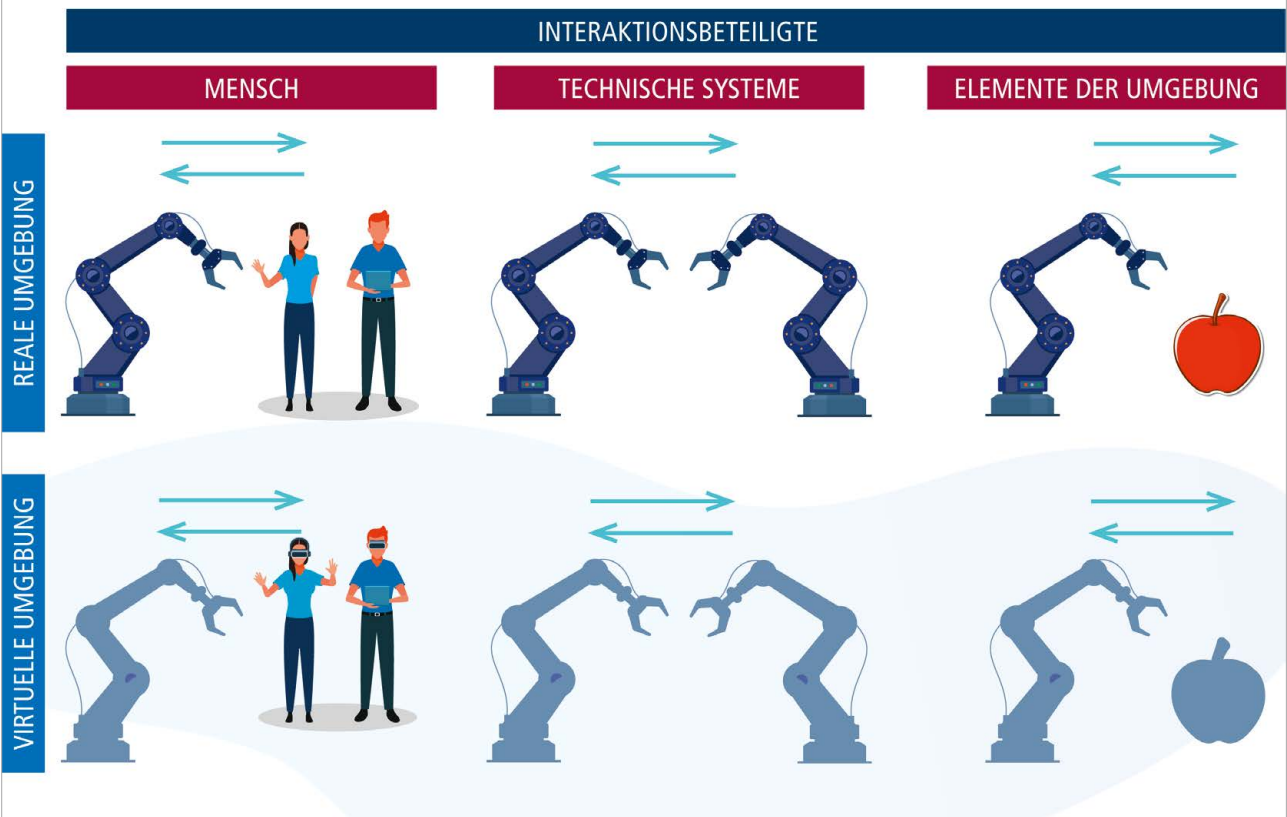
Intelligente Robotiksysteme verfügen über weiterentwickelte Fähigkeiten wie Umwelt- und Selbstwahrnehmung, Planung, Modellbildung und komplexe Handlungsausführung. Beispiel: Ein mobiler Lagerroboter, der selbstständig Objekte erkennt, sie korrekt einsortiert oder auf Anforderung wieder bereitstellt.

Lernfähige Robotiksysteme passen sich an Umweltveränderungen an, indem sie im Betrieb neue Fähigkeiten durch Lernen erwerben und bestehende optimieren. Zum klassischen Zyklus Sense – Understand – Plan – Act tritt die übergreifende Meta-Fähigkeit des Lernens hinzu.

Interaktive Robotiksysteme können aktiv mit ihrer Umwelt oder anderen Akteuren interagieren – also auf Aktionen reagieren und selbst welche auslösen.

Lernen durch Interaktion bedeutet, dass ein Robotersystem in einer realen oder simulierten Umgebung durch Wechselwirkung mit Menschen, anderen Lebewesen, technischen Systemen oder der Umgebung neue Erfahrungen generiert, Fähigkeiten erweitert und sich dabei bei der Erfüllung einer Aufgabe bezüglich geeigneter Gütemaße verbessert. Beispiel: Ein Roboter, dem eine bestimmte Handlung vorgeführt wird, ahmt diese nach. Welche Formen des Lernens durch Interaktion dabei zum Einsatz kommen können, zeigt die Tabelle in einem Überblick. Neben den verschiedenen Lernformen spielt auch die zeitliche Dimension eine Rolle: Denn das Lernen kann in Echtzeit während der Interaktion stattfinden oder zeitversetzt, etwa zwischen verschiedenen Einsätzen.

Tabelle 1: Typologie verschiedener Formen von Lernen durch Interaktion



		INTERAKTIONSBETEILIGTE		
		MENSCH	TECHNISCHE SYSTEME	ELEMENTE DER UMGEBUNG
UMGEBUNG	REAL	Roboter lernt durch Beobachtung und Imitation, Kollaboration, Kommunikation vom Menschen.	Roboter lernt durch Beobachtung und Imitation, Kollaboration, Kommunikation oder Datenaustausch von anderen Robotern.	Roboter interagiert mit Gegenständen in realer Umgebung.
	VIRTUELL	Roboter lernt durch Interaktion mit Mensch(en) in virtueller Umgebung.	Roboter lernen aus Interaktion zwischen virtuellen Repräsentationen der Roboter.	Virtuelle Repräsentation eines Roboters interagiert mit virtuellen Gegenständen.

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Anwendungsfälle

In welchen Bereichen und auf welche Art und Weise interaktive, lernfähige Roboter in naher sowie ferner Zukunft unterstützen können, veranschaulichen sieben Anwendungsbeispiele aus unterschiedlichen Anwendungsdomänen – Medizintechnik, Abfall-/Recyclingwirtschaft, Handwerk, Landwirtschaft, Raumfahrt, Gewässerbewirtschaftung und Pflege. Hierbei werden der Status quo sowie die Zukunftsperspektiven beleuchtet.

Die Zusammenschau der sieben Anwendungsbeispiele identifiziert sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede. Zwei Anwendungsfallgruppen lassen sich erschließen, die spezifische Besonderheiten aufweisen. So lässt sich feststellen, dass sich die Robotiksysteme der Anwendungsfälle, die weit entfernt vom Menschen in unstrukturierten und naturnahen Umgebungen eingesetzt werden (Maritime Robotik, Space Robotik), hinsichtlich ihrer Voraussetzungen (beispielsweise höhere Autonomiegrade, Ressourcen zum Loggen und Aufbereiten von Daten auf dem Roboter) und Herausforderungen (etwa Zugang zu Rechenleistung im laufenden Betrieb) ähneln. Ebenso finden sich Parallelen zwischen den Anwendungsfällen, die näher am Menschen in strukturierten und vom Menschen geprägten Umgebungen eingesetzt werden (Robotik im Handwerk, Recycling und Baumpflege, pflegeunterstützende Robotik und Wearable Robotics). Zu den Voraussetzungen zählen hier unter anderem Datensätze für Roboterfähigkeiten oder Sicherheitskonzepte für Interaktion und Kommunikation mit Robotern; zu den Herausforderungen zählen Ängste, von Domänenfachleuten oder Personal ersetzt zu werden, ebenso aber auch die Integration autonomer Systeme in die betriebliche Praxis inklusive der Aspekte zur funktionalen Sicherheit.

Darüber hinaus existieren auch anwendungsfallübergreifende Synergien zwischen den sieben Anwendungsfällen, von denen mehrere Bereiche der Robotik profitieren.¹ Als exemplarische Beispiele seien zu **Lernverfahren** genannt Reinforcement Learning, Selbst- und weiterlernende Systeme, Supervised Learning, Active Learning, zu **Lernquellen** (3D-) Kameras, multimodale Sensorik, Daten aus virtueller Umgebung bzw. Simulation, Prozess- und Systemdaten und zu **Prozessen**, aus denen gelernt werden kann, menschliches Feedback allgemein, variable Autonomie, Fernsteuerung oder Teleoperation.

Für den erfolgreichen Einsatz lernfähiger Robotiksysteme ist zudem eine umfassende Qualitätssicherung essenziell. In den analysierten Anwendungsfällen wurden insbesondere menschliches Feedback (z. B. Korrekturen, Validierungen, Autorisierungen), dessen automatische Bewertung sowie die Exploration und Prüfung von Lerndaten als zentrale Ansätze genannt. Weitere Maßnahmen sind das Testen und Bewerten gelernter Handlungen in realen oder virtuellen Umgebungen, der statistische Vergleich von Aktionen mit definierten Qualitätskriterien sowie der Einsatz von Kontroll- und Absicherungssystemen. Eine wichtige Rolle spielt auch die systematische Dokumentation mittels Datenrekorden, um das Verhalten der Systeme nachvollziehbar und transparent zu machen.

¹ Bestimmte Aspekte, die in mindestens vier der sieben untersuchten Anwendungsfälle vorkommen, werden als potenzielle Synergien verstanden.

Für die Umsetzung solcher lernfähiger Robotiksysteme sind sowohl technische als auch nichttechnische Voraussetzungen entscheidend. Als technische Voraussetzungen sind beispielsweise robuste Vision-Systeme, multimodale Sensorik, Echtzeitfähigkeit, virtuelle Testumgebungen, die Fähigkeit zum Lernen aus wenigen Beispielen (Few-Shot Learning) und die Einhaltung regulatorischer Vorgaben erforderlich. Als nichttechnische Voraussetzungen sind vor allem das Vertrauen in die Technologie, die Bereitschaft zur Interaktion und die Qualifikation der beteiligten Personen zentrale Faktoren. Beide Perspektiven müssen berücksichtigt werden, um lernfähige und interaktive Robotiksysteme erfolgreich in der Praxis einzusetzen.

Aus den verschiedenen Anwendungsfällen lassen sich zentrale Erkenntnisse interaktiven Lernens in Robotiksystemen zusammenfassen und übergreifende Fokusthemen identifizieren, die für den erfolgreichen Einsatz dieser Technologien entscheidend sind. Im Zentrum stehen dabei insbesondere das Zusammenspiel von technischen Voraussetzungen, wie etwa hohe Sicherheitsanforderungen, ausreichend, einschlägige Daten oder spezielle technische Anforderungen, und nichttechnischen Voraussetzungen beispielsweise komplexe Zulassungsverfahren, Unklarheiten hinsichtlich rechtlicher Rahmenbedingungen (z. B. DSGVO, KI-Verordnung), aber auch wirtschaftliche Unsicherheiten. Weitere Fokusthemen sind der Aufbau von Vertrauen in Robotiksysteme, Aspekte der funktionalen Sicherheit, das Lernen in virtuellen Umgebungen durch Simulationen sowie der Umgang mit variabler Autonomie.

Gestaltungsoptionen

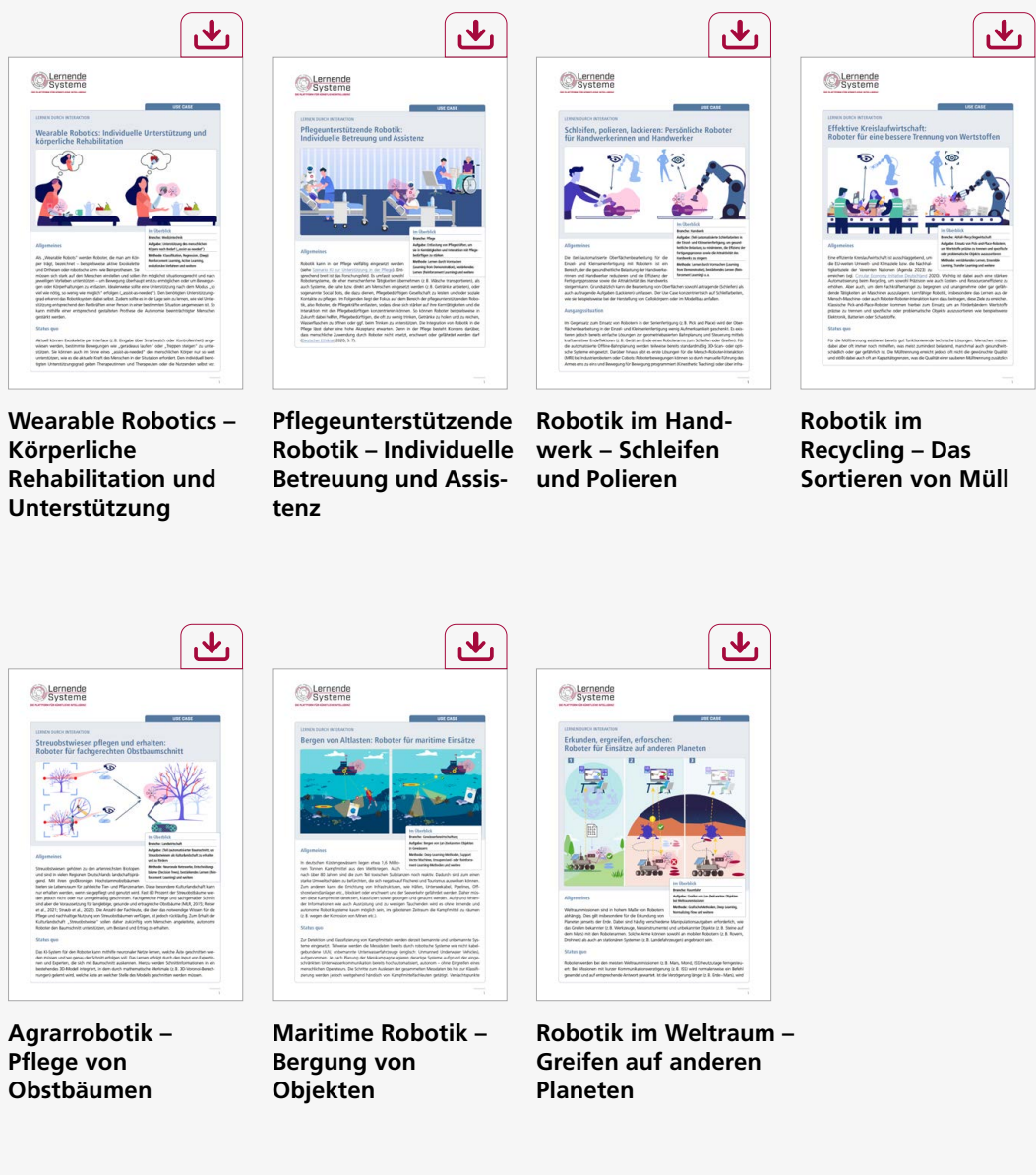
Aus der Gesamtschau ergeben sich wichtige Gestaltungsmöglichkeiten für Forschung, Entwicklung und Transfermaßnahmen, um das Potenzial der Robotik für Wachstum und gesellschaftliche Herausforderungen zu nutzen. Denn das in diesem Whitepaper vorgestellte Konzept des Lernens durch Interaktion denkt KI, Interaktion, Simulation und Autonomie in der Robotik stärker zusammen, sodass Roboter nicht nur durch KI zu intelligenten Robotiksystemen werden, sondern auch durch Interaktion weiter lernen können. Dies ermöglicht eine schrittweise (Teil-)Automatisierung in neue Bereiche sowie die Anpassung von Robotiksystemen an neue Aufgaben, Anforderungen und Umgebungen. Dieser Aspekt sollte bei der zukünftigen Entwicklung von Strategien und Maßnahmen stärkere Berücksichtigung finden, um die Entwicklung interaktiver, lernfähiger Robotiksysteme voranzutreiben, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Forschung und Entwicklung im Bereich der Robotik sollten daher Modularität und Synergien zwischen Anwendungsbereichen vorantreiben, um Kosten zu senken und Innovationen zu beschleunigen. Wichtige Themen sind die Integration von KI, Hardware und Software sowie die Förderung von interdisziplinärer Zusammenarbeit oder Echtzeitfähigkeit, beispielsweise über Edge-AI-Ansätze, vor allem aber auch Sicherheitskonzepte und die Sicherstellung der Qualität des menschlichen Feedbacks im Lernprozess. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Sammlung und Aufbereitung von Daten, um Deep Learning zu ermöglichen. Darüber hinaus sollte die Entwicklung variabler Autonomie und die Anpassbarkeit von Robotern vorangetrieben werden, um eine breitere Anwendbarkeit zu gewährleisten.

Für den Transfer von interaktiven, lernfähigen Robotersystemen in die Praxis sollte der Analyse zur Wirtschaftlichkeit von Robotersystemen mehr Bedeutung beigemessen werden, etwa durch die Analyse von Lebenszykluskosten und Leistungskennzahlen von Unternehmen vor und nach der Einführung von Robotern. Pilotprojekte mit partizipativer Forschung, die frühzeitig relevante Stakeholder, wie Unternehmen, Arbeitnehmervertretungen, Gewerkschaften, TÜV, Technik, Wissenschaft, und Endanwendende, wie etwa Pflegebedürftige und ihre Angehörigen, einbinden, fördern zudem den Aufbau von Vertrauen in die Technologie und beschleunigen die Marktreife. Um Robotersysteme praxisnah zu testen und Transferbarrieren zu identifizieren, sollten Reallabore und Testumgebungen weiter vorangetrieben werden.

Daneben sollte die gesellschaftliche Diskussion weiterhin über den Einsatz von KI in Robotersystemen parallel zur technologischen Entwicklung geführt werden, mit besonderem Fokus auf ethische Aspekte hinsichtlich Autonomie und Interaktion. Stakeholder aus verschiedenen Bereichen, darunter auch Betroffene wie Pflegebedürftige, sollten in Expertengruppen oder Foren zusammenarbeiten, um ethische Standards und Anwendungsgrenzen zu definieren. In Bereichen wie Medizin und Pflege müssen auch Fragen der Kostenerstattung und der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit diskutiert werden. Zudem sollten Normungsorganisationen klare technische Standards für die Zertifizierung von interaktiven und kontinuierlich lernenden Robotersystemen vorgebracht werden.

Anwendungsfälle interaktive, lernfähige Robotiksysteme



Impressum

Herausgeber: Lernende Systeme – Die Plattform für Künstliche Intelligenz | Geschäftsstelle | c/o acatech | Karolinenplatz 4 | D-80333 München | presse@plattform-lernende-systeme.de | www.plattform-lernende-systeme.de | Folgen Sie uns auf LinkedIn: de.linkedin.com/company/plattform-lernende-systeme | Mastodon: social.bund.de/@LernendeSysteme | Stand: März 2025 | Bildnachweis: eigene Darstellung/freepik

Diese Kurzfassung entstand auf Grundlage des Whitepapers *KI in der Robotik. Flexible und anpassbare Systeme durch interaktives Lernen*. München, 2025. Es wurde erstellt von Mitgliedern der Arbeitsgruppe Lernfähige Robotiksysteme der Plattform Lernende Systeme. Die Originalfassung der Publikation ist online verfügbar unter: https://doi.org/10.48669/pls_2025-1

GEFÖRDET VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN