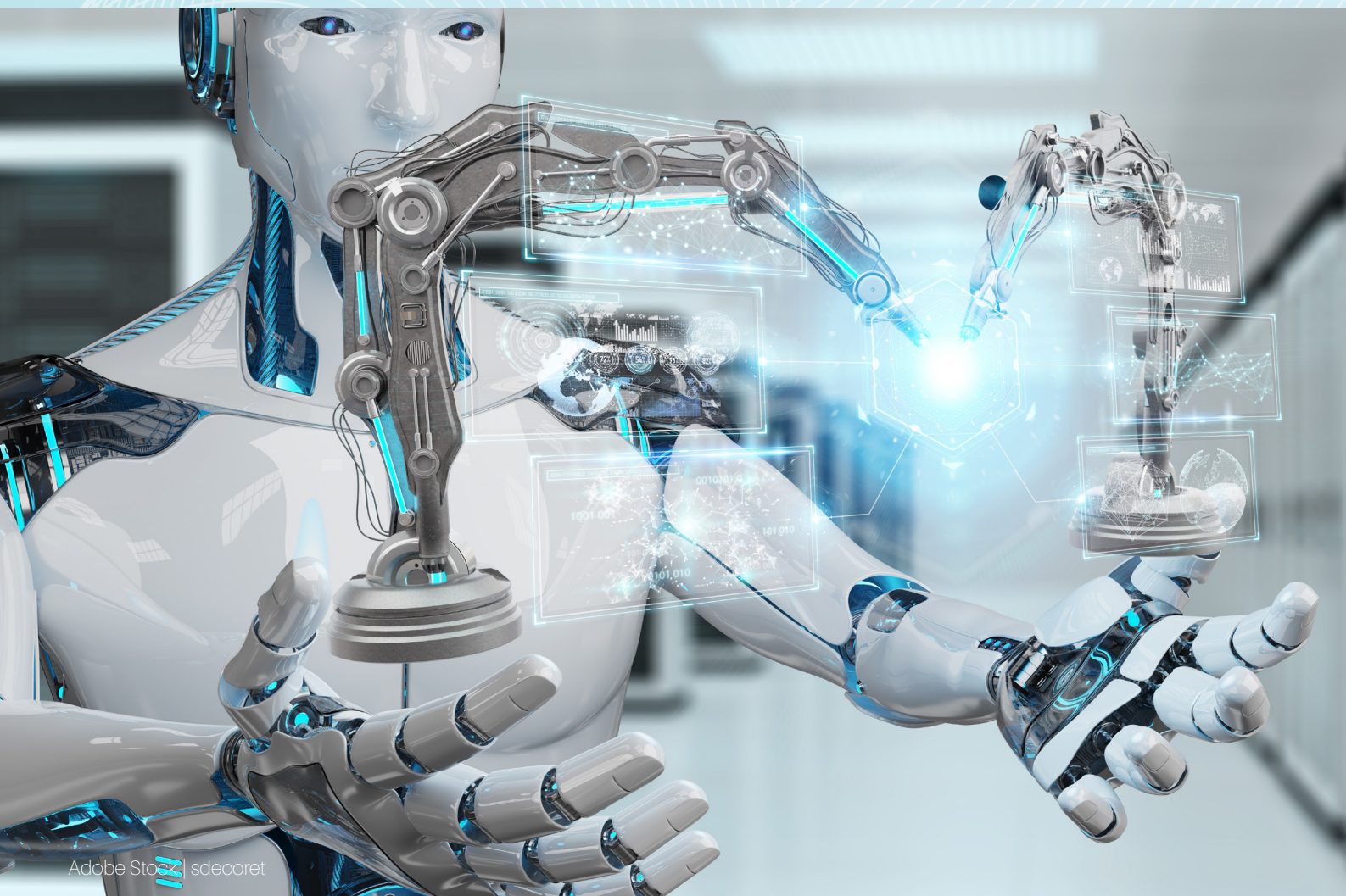


Praxisleitfaden Humanoide Robotik

Von der Auswahl zum Pilotversuch



Vorwort

Goldman Sachs prognostiziert bis 2030 über 250.000 humanoide Roboter - vor allem in der Industrie. Noch gibt es Zweifel, doch der Durchbruch rückt näher.

Sechs Unternehmen unter der Federführung der BRP-Rotax GmbH & Co KG erproben gemeinsam mit der FH Oberösterreich und der Sparte Industrie der Wirtschaftskammer Oberösterreich praxisnahe Einsatzszenarien für KI-gestützte humanoide Robotik im industriellen Kontext. Die Sparte Industrie unterstützt dieses Projekt im Rahmen der Initiative **KI*Transfer** aktiv und setzt sich dafür ein, dass die wichtigsten Erkenntnisse gezielt in die Breite der oberösterreichischen Industrie getragen werden.



Als starker Standortpartner ist es uns ein Anliegen, Schlüsseltechnologien wie KI und humanoide Robotik gemeinsam mit den Leitbetrieben Oberösterreichs in die industrielle Praxis zu bringen. Die enge Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg ist dabei zentral für nachhaltige Innovation und Wettbewerbsfähigkeit.

Martin Bergsmann, Sprecher der Initiative KI*Transfer



Unser Ziel ist, durch technologische Exzellenz unsere eigene Wettbewerbsfähigkeit und die des gesamten Konzerns zu stärken. Als Innovationszentrum innerhalb von BRP treiben wir Schlüsseltechnologien wie KI und humanoide Robotik voran. Gemeinsam mit starken Partnern setzen wir gezielt Impulse, um das Potenzial dieser Technologien auch als Beitrag für den Industriestandort Oberösterreich zu erschließen.

Mario Gebetshuber, General Manager der BRP Rotax GmbH & Co KG



Roboter spielen seit Jahrzehnten eine wichtige Rolle in der Automatisierung. Anforderungen wie die Zusammenarbeit mit Menschen oder das Erlernen von Prozessen zur Lösung komplexer und variabler Aufgaben stellen die Programmierung von Robotersystemen vor neue Herausforderungen.

Thomas Schichl, Projektleiter FH Oberösterreich

Inhalt

Vorwort	2
Management Summary	4
Kernaussagen für das Management	4
Was versteht man unter humanoiden Robotern?	6
Technische Charakteristika humanoider Roboter	6
Programmierungsumgebungen	6
Lernverfahren	7
Welchen Roboter soll ich wählen?	8
Welche Infrastruktur benötige ich für den Roboter?	8
Räumliche und technische Anforderungen	9
IT- und Workstation-Anforderungen	9
Softwarevoraussetzungen	9
Welche Schritte sind beim Start des Roboters zu setzen?	9
Sicherheit an erster Stelle	10
Zusammenarbeit mit dem Hersteller	10
Fehlerdiagnose und digitale Zwillinge	10
Betrieb & Programmierung (am Beispiel des Unitree G1)	10
Reinforcement-Learning	10
Typischer Lernzyklus im Reinforcement Learning	11
Benutzung Unitree G1	12
Wartung & Service	13
Serviceintervalle und Kalibrierung	13
Ersatzteile und Reparaturen	13
Updates und Weiterentwicklung	13
Danksagung	13

Management Summary

Humanoide Robotik hat in den letzten Jahren einen deutlichen **Entwicklungsschub** erfahren. Durch die Kombination menschenähnlicher Bewegungsmuster mit modernen **KI-Methoden** wie **Reinforcement Learning** ergeben sich neue Einsatzmöglichkeiten in der Industrie. Internationale Vorreiter setzen bereits auf Systeme, die in Größe, Beweglichkeit und Funktionalität stark am Menschen orientiert sind.

In Oberösterreich wird das Thema praxisnah erprobt: Unter Federführung der **BRP-Rotax GmbH & Co KG**, in Kooperation mit fünf weiteren Unternehmen, der **FH Oberösterreich** sowie der **Sparte Industrie** der **WKOÖ**, werden Pilotversuche mit einem humanoiden Roboter durchgeführt. Im Mittelpunkt stehen **realistische Use Cases** in Produktionsumgebungen, die sowohl Potenziale als auch Grenzen aufzeigen. Ein Schwerpunkt liegt auf **physikalisch basierter KI**, mit der Prozesse simuliert und Abläufe virtuell trainiert werden können.

Der vorliegende Leitfaden konzentriert sich auf die **technisch-organisatorischen Grundlagen**: Auswahlkriterien, Infrastrukturbedarf, Inbetriebnahme sowie Wartung und Service im Rahmen von Pilotprojekten. Rechtliche, soziale und sicherheitsrelevante Fragestellungen werden bewusst ausgeklammert. Für Detailinformationen zum Stand der Technik, industriellen Einsatzgebieten und Marktentwicklung empfehlen wir die Publikation „Industrielle Roboter, Humanoide Roboter“ der Industriellenvereinigung Oberösterreich.

Kernaussagen

- **Nutzenpotenzial:** Humanoide Roboter können in bestehenden Arbeitsumgebungen eingesetzt werden, ohne dass umfassende Anpassungen erforderlich sind. Sie bieten Flexibilität, Kollaborationsfähigkeit und die Chance, Prozesse durch KI-gestütztes Lernen zu optimieren.
- **Technische Herausforderungen:** Komplexe Steuerungssysteme, begrenzte Betriebszeiten, hoher Integrationsaufwand und noch nicht ausgereifte digitale Zwillinge bremsen derzeit den industriellen Masseneinsatz.
- **Pilotbetrieb:** Für die Beschaffung eines Roboters und die ersten Pilotversuche sind ein klar definierter Anwendungsfall, gezielte Auswahl von Sensorik und Greifern sowie ein enger Austausch mit Herstellern essenziell.
- **Inbetriebnahme & Sicherheit:** Ohne integrierte Sicherheitsfunktionen ist ein Betrieb nur mit geschultem Personal, klaren Schutzmaßnahmen und definierten Sicherheitsabständen möglich.
- **Wartung & Service:** Da vielfach keine standardisierten Servicekonzepte existieren, sind Unternehmen gefordert, eigene Wartungsprozeduren zu definieren. Ersatzteilversorgung und Softwareupdates sind zentrale Faktoren für eine langfristige Einsatzfähigkeit.

Fazit

Humanoide Robotik ist ein hochdynamisches Feld mit großem Potenzial für die oberösterreichische Industrie. Der industrielle Einsatz befindet sich noch in der Pilotphase. Umso wichtiger ist es, bereits heute, Praxiswissen aufzubauen, Kompetenzen im Unternehmen zu entwickeln und strategische Weichen für die Zukunft zu stellen.

Humanoide Robotik für die OÖ Industrie

Humanoide Robotersysteme haben in den letzten Jahren sowohl in der Forschung als auch in der Industrie zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch die Nachahmung menschlicher Bewegungsmuster und die Integration moderner KI-Methoden wie Reinforcement Learning eröffnen sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten.

Sechs Unternehmen unter der Federführung der BRP-Rotax GmbH & Co KG erproben gemeinsam mit der FH Oberösterreich und der Sparte Industrie der Wirtschaftskammer Oberösterreich praxisnahe Einsatzszenarien für KI-gestützte humanoide Robotik im industriellen Kontext. Im Zentrum stehen praxisorientierte Fragestellungen und technische Umsetzungsschritte zur Einsatzfähigkeit humanoider Roboter in realen Produktionsumgebungen. Im Zentrum stehen praxisnahe Use Cases, um die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der aktuellen humanoiden Robotik zu verstehen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf physikalischer KI, mit der Produktionsprozesse virtuell trainiert und realitätsnah simuliert werden können. Lernende Systeme sollen künftig nicht nur Abläufe optimieren, sondern vor allem Mitarbeiter gezielt unterstützen.



Dieser Leitfaden konzentriert sich ausschließlich auf die technisch-organisatorischen Schritte im Rahmen der Beschaffung, der Erstinbetriebnahme sowie der Durchführung erster Pilotversuche. Themen wie rechtliche Fragestellungen, sicherheitsrelevante Aspekte oder weiterführende Betrachtungen sind ausdrücklich nicht Bestandteil dieses Dokuments und werden daher nicht behandelt.

Was versteht man unter humanoiden Robotern?

Humanoide Roboter sind komplexe mechatronische Systeme, die sich in Form und Bewegungsweise am menschlichen Körper orientieren. Ihre Hauptvorteile liegen in der Fähigkeit, in den für Menschen geschaffenen Umgebungen zu operieren, sowie in der Möglichkeit, soziale und kollaborative Interaktionen zu realisieren.

Typische Anwendungsfelder reichen von Servicerobotik über industrielle Automatisierung bis hin zu medizinischen Assistenzsystemen. Die Herausforderungen liegen dabei insbesondere in der komplexen Steuerung von Mehrgelenksystemen, der Balancekontrolle und der effizienten Energieversorgung. Unabhängig vom Hersteller teilen humanoide Roboter zentrale Merkmale, die für ihre Funktionsfähigkeit essenziell sind.

Technische Charakteristika humanoider Roboter

Körpergröße und Gewicht: Humanoide Roboter bewegen sich meist in einer Größenordnung von 1,2 bis 1,8 m bei einem Gewicht von 30 bis 100 kg. Dadurch können sie in menschlichen Umgebungen agieren, ohne infrastrukturelle Anpassungen. Beispiele sind Atlas (Boston Dynamics, ca. 1,5 m, 89 kg) und Optimus (Tesla, ca. 1,7 m, 73 kg).

Freiheitsgrade (Degrees of Freedom, DOF): Für menschenähnliche Bewegungen verfügen humanoide Roboter über 20-40 DOF, verteilt auf Extremitäten, Kopf und Torso. Eine höhere Anzahl ermöglicht präzisere und vielseitigere Bewegungen.

Sensorik: Zur Umgebungs- und Eigenwahrnehmung kommen u. a. RGB- und Tiefenkameras, IMUs, Lidar- sowie taktile Sensoren zum Einsatz.

Recheneinheiten: Leistungsstarke Onboard-Computer mit GPUs oder KI-Beschleunigern erlauben die Echtzeitverarbeitung von Sensordaten und komplexen Steuerungsalgorithmen.

Energieversorgung: Meist kommen Lithium-Ionen-Akkus zum Einsatz, die je nach System und Aufgaben eine Betriebsdauer von 1-3 Stunden ermöglichen.

Kommunikation und Steuerung: Standardisierte Schnittstellen (z. B. Ethernet, Wi-Fi, 5G) und Plattformen wie ROS, herstellereigene SDKs oder Simulationsumgebungen (z. B. MuJoCo, Isaac Sim/Lab) dienen zur Programmierung und Steuerung.

Herstellerschwerpunkte: Während Atlas auf dynamische Bewegung spezialisiert ist, fokussiert sich Optimus auf industrielle Anwendungen und Energieeffizienz. Systeme wie Unitree H1 oder G1 bieten kompaktere und kosteneffiziente Alternativen.

Programmierungsumgebungen

Für die Entwicklung von Steuerungsstrategien humanoider Roboter stehen verschiedene Softwareumgebungen und Entwicklungswerkzeuge zur Verfügung. Eine zentrale Plattform ist das Robot Operating System (ROS). ROS stellt eine modulare Middleware dar, die den Austausch von Sensordaten, die Ansteuerung von Aktoren und die Integration von Algorithmen ermöglicht. Es gilt als Standard in der Robotikforschung und bietet durch seine offene Architektur eine hohe Flexibilität. Hauptsächlich wird ROS für die Integration und Koordination von Modulen zur Sensordatenauswertung, Bewegungsplanung und Kinematikberechnung verwendet.

Das von Unitree bereitgestellte Unitree RL ist ein Toolkit für Reinforcement Learning, das auf NVIDIA Isaac Lab/Isaac Sim basiert. Isaac Sim stellt dabei eine GPU-beschleunigte Simulationsumgebung mit physikalisch realistischen Modellen zur Verfügung. Unitree RL ermöglicht es, Bewegungsstrategien in der Simulation zu trainieren und die trainierten Modelle anschließend auf die reale Hardware zu übertragen. Neben Isaac Sim kommen auch andere Plattformen für maschinelles Lernen und robotische Simulation zum Einsatz, etwa Unity, das mit seiner flexiblen 3D-Engine und Physik-Simulation zunehmend für RL-Experimente genutzt wird, sowie MATLAB, das durch spezialisierte Toolboxes umfassende Funktionen für Reinforcement Learning, Kinematik und Steuerung bietet.

Eine weitere Möglichkeit ist die Teleoperation, bei der der Roboter durch externe Eingabegeräte wie Joysticks, Datenhandschuhe oder Augmented-Reality-Brillen gesteuert wird. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere für Tests, Demonstrationen und die Generierung von Trainingsdaten.

Zusätzlich stellt der Hersteller ein Software Development Kit (SDK) mit Schnittstellen in C++ und Python bereit. Es erlaubt sowohl Low-Level-Zugriffe, beispielsweise auf einzelne Motoren, als auch High-Level-Kommandos für komplexe Bewegungsabläufe.

Lernverfahren

Imitation Learning bezeichnet ein Verfahren des maschinellen Lernens, bei dem humanoide Roboter Bewegungsabläufe durch Nachahmung menschlicher Demonstrationen erlernen. Die dafür benötigten Daten werden typischerweise über Motion-Capture-Systeme, Teleoperation oder sensorbasierte Erfassung von Gelenkstellungen gewonnen und anschließend auf das Robotermodell übertragen. Bewegungen lassen sich auf diese Weise effizient und mit hoher Natürlichkeit übernehmen, ohne dass umfangreiche Optimierungsprozesse erforderlich sind. Die Qualität der gelernten Abläufe hängt jedoch stark von der Vielfalt und Genauigkeit der Demonstrationen ab. Zudem ist die Generalisierungsfähigkeit begrenzt, da der Roboter primär bekannte Bewegungsmuster imitiert und selten eigenständig neue Strategien entwickelt.

Reinforcement Learning nutzt ein Belohnungssystem, bei dem der Roboter durch Ausprobieren in einer simulierten oder realen Umgebung eigenständig Handlungsstrategien erlernt. Positive oder negative Rückmeldungen führen zur schrittweisen Verbesserung von Bewegungen wie Gehen, Greifen oder Balancieren. Aufgrund des hohen Rechenaufwands erfolgt das Training meist in Simulationsumgebungen wie Isaac Sim oder Unity, bevor die Modelle per Sim-to-Real-Transfer auf reale Roboter übertragen werden.

Kombinierte Ansätze nutzen zunächst Imitation Learning zur schnellen Erlernung grundlegender Bewegungsmuster, welche anschließend durch Reinforcement Learning optimiert und an komplexe Situationen angepasst werden. Diese hybride Methode reduziert die Trainingszeit und erhöht zugleich die Robustheit der resultierenden Steuerungsstrategien.

Inverse Kinematik dient der Berechnung der Gelenkwinkel, die notwendig sind, um eine gewünschte Endeffektorposition (z. B. einer Hand oder eines Fußes) zu erreichen. Bei humanoiden Robotern mit zahlreichen Freiheitsgraden existieren meist viele mögliche Lösungen, was die Berechnung komplex und rechenintensiv macht. Zur Bewältigung dieser Herausforderung werden häufig Optimierungsverfahren eingesetzt, welche stabile, kollisionsfreie und energieeffiziente Bewegungen identifizieren. In Echtzeitanwendungen sind solche Berechnungen nur mithilfe leistungsfähiger Hardware oder vereinfachter Modelle praktikabel.

Welchen Roboter soll ich wählen?

Die Auswahl des passenden humanoiden Roboters ist ein entscheidender Schritt, um einen nachhaltigen Nutzen im Betrieb sicherzustellen. Schon vor der Beschaffung lohnt es sich, Kriterien systematisch zu betrachten und mit den eigenen Anforderungen abzugleichen.

Verfügbarkeit und Kosten spielen naturgemäß eine zentrale Rolle. Neben dem Anschaffungspreis sind laufende Kosten wie Wartung, Updates und Ersatzteile in die Gesamtbetrachtung einzubeziehen.

Noch wichtiger ist ein **klar definierter Anwendungsfall**. Erst wenn genau feststeht, welche Aufgaben der Roboter übernehmen soll, lassen sich technische Parameter sinnvoll bewerten:

- **Traglast und Größe** bestimmen, ob der Roboter die vorgesehenen Werkstücke oder Werkzeuge handhaben kann.
- **Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsraum** geben an, wie effizient er in die vorhandenen Prozesse eingebunden werden kann.
- **Beweglichkeit (Degrees of Freedom, DOF)** entscheidet über die Flexibilität bei komplexen Bewegungen.
- **Sensorik** sowie die passende **Greifer-Technologie** sind ausschlaggebend für Präzision, Sicherheit und Vielseitigkeit.
- Auch die **Umgebungsbedingungen** dürfen nicht unterschätzt werden: Staub, Hitze, Kälte oder Vibrationen beeinflussen, wie zuverlässig der Roboter im Dauerbetrieb arbeitet.

Ein weiteres zentrales Kriterium ist die **Integration**. Ein humanoider Roboter entfaltet seinen Wert erst, wenn er reibungslos mit vorhandenen Maschinen, IT-Systemen und Arbeitsabläufen zusammenspielt.

Daran schließt sich die Frage der **Programmierbarkeit** an. Hier kommt es auf die vorhandenen Kompetenzen im Unternehmen an: Soll der Roboter mit Windows oder Linux laufen? Welche Plattformen stehen für die Programmierung zur Verfügung? Je besser die Lösung zu den Skills der Mitarbeiter passt, desto geringer ist der Schulungsaufwand.

Auch wenn **Standards und Zertifizierungen** sowie regulatorische Fragen in diesem Leitfaden nicht vertieft behandelt werden, ist es wichtig, sich über kollaborative Fähigkeiten und geltende Sicherheitsanforderungen zu informieren.

Nicht zuletzt sollte man die **Service- und Supportstrukturen** des Anbieters prüfen. Eine gute Ersatzteilverfügbarkeit, regelmäßige Software-Updates und verlässlicher technischer Support sind ausschlaggebend, um Ausfallzeiten zu minimieren und die Investition langfristig abzusichern.

Welche Infrastruktur benötige ich für den Roboter?

Damit ein humanoider Roboter zuverlässig arbeiten kann, braucht es eine durchdachte Infrastruktur. Dabei geht es nicht nur um den physischen Arbeitsplatz, sondern auch um IT-Systeme und Softwareumgebungen.

Räumliche und technische Anforderungen

Die **Stromversorgung** ist grundlegend. Viele Modelle - wie etwa der Unitree G1 - können sich nicht selbst laden. Das bedeutet: Akkus müssen extern geladen und regelmäßig gewechselt werden.

Auch der **Platzbedarf** sollte berücksichtigt werden. Für die meisten Anwendungen reichen rund 15 m² aus, wichtig ist allerdings die Beschaffenheit des Bodens. Ein griffiger Untergrund (z. B. Teppich) sorgt für Stabilität, insbesondere wenn der Roboter mobil eingesetzt wird.

Zusätzlich können **Gerüste oder Ständer** sinnvoll sein, um den Roboter während Wartungsarbeiten oder beim Akkutauch sicher zu fixieren.

IT- und Workstation-Anforderungen

Für einfache Befehle oder Tests reicht die im Roboter integrierte Recheneinheit aus. Bei **komplexeren Programmierungen** wird jedoch ein leistungsfähiger PC benötigt. Geht es um **Reinforcement Learning** oder **Imitation Learning**, ist eine Workstation mit mindestens 64 GB RAM und einer Grafikkarte mit 16 GB VRAM empfehlenswert.

Auch **zusätzliche Sensorik** kann erforderlich sein. Externe Kameras oder spezielle Sensoren sind vor allem bei Imitation Learning nützlich. Da sie zusätzlichen Integrationsaufwand und Gewicht verursachen, sollten sie nur gezielt eingesetzt werden.

Die Auswahl der **Greifer- und Werkzeugtechnologie** richtet sich nach dem Anwendungsfall. Ob 3-Finger- oder 5-Finger-Hände, taktile Sensoren oder spezielle Werkzeuge - entscheidend ist die Kompatibilität mit den Schnittstellen (z. B. USB) und den unterstützten Treibern des Roboterherstellers. Wo nötig, können auch Bibliotheken mit Grundfunktionen eingebunden werden.

Derzeit erfolgt die Ansteuerung vieler humanoider Roboter über **LAN-Verbindungen** - ein Faktor, der bei der Infrastrukturplanung berücksichtigt werden sollte.

Softwarevoraussetzungen

Einige Softwarepakete werden standardmäßig vom Hersteller mitgeliefert - typischerweise eine **App**, das Framework **ROS** sowie oft auch **Open-Source-Pakete** über Github. Für Simulationen stehen meist Freeware-Lösungen bereit, die separat beschafft und eingerichtet werden müssen.

Wichtig ist die **Integration in die bestehende IT-Landschaft**: Kommunikationsprotokolle, Datenmanagement und Sicherheitsmechanismen wie Firewalls oder Zugriffskontrollen spielen eine wesentliche Rolle. Für den Start empfiehlt es sich, eine **dedizierte Workstation** zu nutzen, die vom Unternehmensnetzwerk entkoppelt ist. So können Tests sicher erfolgen, bevor der Roboter später in die Produktions-IT eingebunden wird.

Welche Schritte sind beim Start des Roboters zu setzen?

Die Inbetriebnahme eines humanoiden Roboters ist weit mehr als nur das Einschalten der Maschine. Sie erfordert klare Sicherheitskonzepte, eine sorgfältige Vorbereitung der Umgebung und ein realistisches Erwartungsmanagement hinsichtlich der technischen Möglichkeiten.

Sicherheit an erster Stelle

Da viele humanoide Roboter derzeit **keine integrierten Sicherheitsfunktionen** besitzen, ist ein unbegleiteter Betrieb durch Laien nicht zulässig. **Persönliche Schutzausrüstung (PSA)** ist Pflicht, und der Einsatz darf ausschließlich durch geschultes Personal erfolgen.

Zur Absicherung der Arbeitsumgebung gehören jedenfalls:

- gut sichtbare **Beschilderung** und **Bodenmarkierungen**,
- ein **abgeschlossener Raum** oder klar abgegrenzte Zonen,
- **Signallampen** zur Anzeige des Betriebszustands,
- definierte **Sicherheitsabstände**,
- sowie **Begrenzungen von Geschwindigkeit und Kraft**.

Diese Maßnahmen ersetzen keine fehlenden Sicherheitsfunktionen, senken aber das Risiko im Betrieb.

Zusammenarbeit mit dem Hersteller

Ein enger **Kontakt mit dem Hersteller** ist empfehlenswert - teilweise sogar notwendig. Viele Fragen zu Dokumentation, Fehlermeldungen oder Aktivierung bestimmter Funktionen lassen sich nur direkt mit dem Anbieter klären. Insbesondere, wenn einzelne Komponenten separat freigeschaltet werden müssen, führt an diesem Austausch kein Weg vorbei.

Fehlerdiagnose und digitale Zwillinge

Die **Fehlerdiagnose** gestaltet sich oft schwierig. Statt eines klassischen Handbuchs mit definierten Fehlercodes gibt es meist nur rudimentäre Hinweise. Häufig treten überraschende Effekte auf, etwa unerwartetes Verhalten in der Simulationsumgebung.

Zwar verfügen moderne humanoide Roboter über eine enorme Rechenleistung, doch die Konzepte rund um den **digitalen Zwilling** sind noch nicht ausgereift. Schon kleine Änderungen an den Rahmenbedingungen - ein anderer Bodenbelag, ein neues Werkzeug oder eine zusätzliche Sensorik - können die Erstellung eines komplett neuen digitalen Abbilds erfordern.

Betrieb & Programmierung (am Beispiel des Unitree G1)

Für die Simulation von humanoiden Robotern ist NVIDIA Isaac Sim eine der wichtigsten Plattformen. Diese basiert auf der Omniverse-Engine und ermöglicht realistische Simulationen mit physikalisch basierter Modellierung. Voraussetzungen sind in der Regel ein aktuelles Ubuntu-System sowie eine leistungsfähige NVIDIA-Grafikkarte.

Reinforcement-Learning

Reinforcement Learning wird zunehmend in der humanoiden Robotik eingesetzt, da es die Möglichkeit bietet, komplexe Bewegungsstrategien durch Interaktion mit der Umgebung selbstständig zu erlernen, ohne dass explizite Regelwerke oder vollständige Modelle erforderlich sind. Ein wesentlicher Aspekt für den Einsatz dieses Lernverfahrens ist zudem die direkte Unterstützung durch den Hersteller Unitree, der

mit dem Toolkit Unitree RL eine auf Reinforcement Learning ausgerichtete Entwicklungsumgebung bereitstellt.

Der Zyklus im Reinforcement Learning beschreibt den iterativen Prozess, durch den ein Agent schrittweise ein gewünschtes Verhalten erlernt. Hierbei interagiert der sogenannte Agent mit einer Umgebung (Environment), um durch Erfahrung eine optimale Handlungsstrategie zu erlernen. Der Agent ist dabei das lernende System, beispielsweise ein humanoider Roboter, das auf Basis von Wahrnehmungen Entscheidungen trifft und Handlungen ausführt. Die Umgebung umfasst alles außerhalb des Agenten, also die physikalische oder simulierte Welt, in der er sich bewegt. Sie stellt Informationen bereit, reagiert auf Handlungen und liefert Rückmeldungen über den Erfolg oder Misserfolg dieser Handlungen.

Die vom Agenten wahrgenommene Information über den aktuellen Zustand der Umgebung wird als Observation bezeichnet. Diese kann durch verschiedene Sensoren gewonnen werden, etwa durch Kamerabilder, Lidar, IMUs oder taktile Sensoren. Anhand dieser Beobachtung wählt der Agent eine bestimmte Aktion (Action) aus, die auf seiner aktuellen Policy basiert. Die Policy ist eine Entscheidungsregel, die jedem beobachteten Zustand eine Handlung zuordnet. Ziel ist es, durch Verbesserung dieser Policy im Laufe der Zeit immer bessere Entscheidungen zu treffen.

Die Umgebung reagiert auf die ausgeführte Aktion und liefert dem Agenten eine Belohnung (Reward). Diese Belohnung ist ein numerischer Wert, der angibt, wie gut die Aktion im Hinblick auf ein definiertes Ziel war. Positive Werte verstärken erwünschtes Verhalten, negative Werte (Strafen) dämpfen unerwünschte Aktionen.

Der Lernprozess wird durch einen Reinforcement Learning Algorithmus gesteuert, der anhand der erhaltenen Beobachtungen und Belohnungen die Policy des Agenten optimiert. Dieser Algorithmus bildet das Kernstück des Lernverfahrens. Häufig verwendete Typische Reinforcement-Learning-Algorithmen sind Q-Learning, Deep Q-Networks (DQN) oder Proximal Policy Optimization (PPO). Ziel ist es, eine Policy zu finden, die den langfristig erwarteten kumulierten Reward maximiert - also nicht nur kurzfristige Erfolge berücksichtigt, sondern strategisches Handeln fördert.

Typischer Lernzyklus im Reinforcement Learning

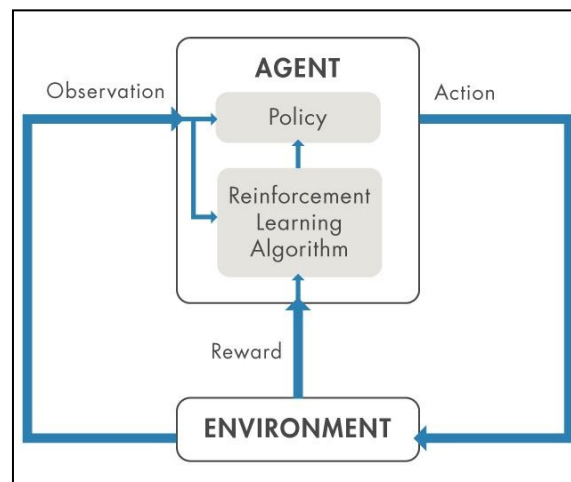


Abbildung 1 Lernzyklus

1. **Observation:** Der Agent nimmt den aktuellen Zustand der Umgebung wahr.
2. **Action:** Basierend auf seiner Policy wählt der Agent eine passende Aktion und führt sie aus.

3. **Environment Reaction:** Die Umgebung verändert sich in Reaktion auf die Aktion.
4. **Reward:** Der Agent erhält eine Belohnung, die angibt, wie sinnvoll seine Aktion war.
5. **Policy Update:** Der Reinforcement Learning Algorithmus nutzt die neuen Daten, um die Policy anzupassen.
6. **Neuer Zyklus:** Der Prozess beginnt erneut mit einer neuen Observation.

Dieser Zyklus wiederholt sich in hoher Frequenz über sehr viele Iterationen. Anfangs sind die Bewegungen des Roboters zufällig und instabil. Mit zunehmender Wiederholung und Optimierung lernt der Agent jedoch schrittweise, welche Abfolgen von Aktionen zu positiven Ergebnissen führen. Beim Gehen lernen bedeutet dies, dass der Roboter zunächst zufällige Bewegungen ausführt, später kurze Schritte meistert und schließlich ein stabiles, kontinuierliches Gehmuster entwickelt. Das erlernte Verhalten entsteht somit nicht durch explizite Programmierung, sondern durch die systematische Verbesserung der Policy auf Grundlage von Belohnungssignalen.

Benutzung Unitree G1

Der Unitree G1 kann auf verschiedene Arten gesteuert werden, wie in *Abbildung 2* dargestellt. Links sind die Eingabemöglichkeiten aufgeführt: über den PC zur Durchführung von Reinforcement & Imitation Learning und für die direkte Ansteuerung, über die Unitree-App sowie über die mitgelieferte Fernbedienung. Diese Eingaben wirken auf den Roboter in der Mitte.

Auf der rechten Seite sind die Zielumgebungen und Ausführungen dargestellt: Oben die Simulationsumgebung MuJoCo, die vor allem für schnelle und effiziente physikbasierte Tests eingesetzt wird, in der Mitte Isaac Sim, in dem Reinforcement Learning trainiert und Bewegungsstrategien validiert werden, sowie unten der reale Roboter in Aktion.

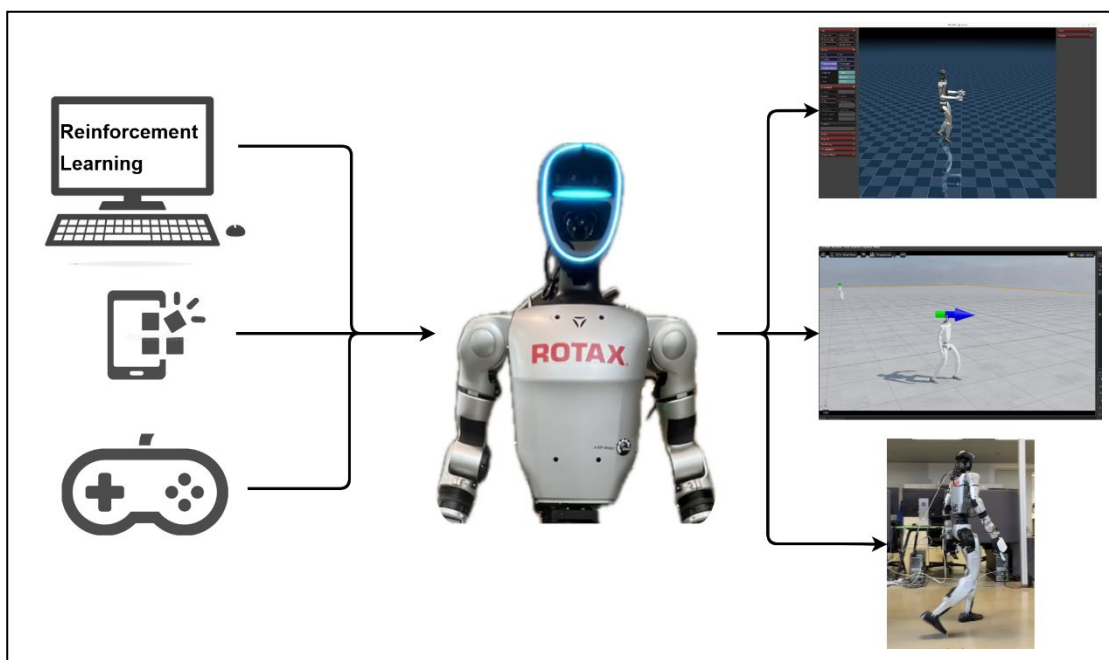


Abbildung 2 Benutzung

Simulationen bieten die Möglichkeit, komplexe Szenarien zu testen, ohne den realen Roboter zu gefährden. Besonders im Reinforcement Learning sind Tausende von Simulationsläufen erforderlich, die nur in einer virtuellen Umgebung praktikabel sind.

Wartung & Service

Damit ein humanoider Roboter langfristig zuverlässig arbeitet, braucht es klare Routinen für Wartung, Service und Aktualisierungen. Auch wenn viele Hersteller noch keine standardisierten Vorgaben liefern, empfiehlt es sich, eigene Betriebsrichtlinien zu etablieren.

Serviceintervalle und Kalibrierung

Regelmäßige **Serviceintervalle** sind wichtig, auch wenn aktuell keine festen Vorgaben der Hersteller existieren. Insbesondere die **Kalibrierung** sollte in definierten Abständen durchgeführt werden, um Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Bewegungen sicherzustellen. Da keine verbindlichen Servicepläne vorliegen, ist es sinnvoll, erste Erfahrungen aus dem laufenden Betrieb zu sammeln und daraus interne Intervalle abzuleiten.

Ersatzteile und Reparaturen

Bislang zeigen sich bei humanoiden Robotern **keine klaren Schwachstellen**, die systematisch ausfallen würden. Tritt dennoch ein Defekt auf, lassen sich einzelne **Aktoren oder Sensoren** separat beschaffen und - je nach technischer Ausstattung des Unternehmens - auch selbst austauschen. Ein umfassender Vor-Ort-Service durch den Hersteller ist selten vorgesehen, daher sollte man rechtzeitig die **Lieferketten für Ersatzteile** prüfen und eigene Kompetenzen im Austausch aufbauen.

Updates und Weiterentwicklung

Ein wesentlicher Bestandteil der Wartung sind **Firmware- und Softwareupdates**. Sie dienen nicht nur der Fehlerbehebung, sondern bringen häufig auch **neue Funktionen** mit sich. Daher sollten Updates regelmäßig eingespielt und dokumentiert werden. Unternehmen profitieren doppelt: von einer stabileren Systemperformance und von kontinuierlichen Funktionsverbesserungen, die den Roboter im Laufe der Zeit leistungsfähiger machen.

Danksagung

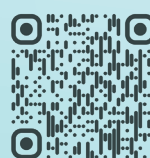
Wir danken **BRP-Rotax GmbH & Co KG**, insbesondere General Manager Mario Gebetshuber sowie den Projektverantwortlichen Gerald Greiner und Christian Kerl, für ihr herausragendes Engagement. Erst durch die Beschaffung des humanoiden Roboters durch BRP-Rotax und die Bereitschaft, weitere oberösterreichische Industrieunternehmen in das Projekt einzubinden, wurde dieses Vorhaben möglich.

Ein besonderer Dank gilt zudem der **Fachhochschule Oberösterreich** und dem Team um Thomas Schichl für das exzellente Projektmanagement sowie die kompetente wissenschaftliche Begleitung.

Bleiben Sie auf dem Laufenden

Besuchen Sie die Projektwebsite, um alle Neuigkeiten und Entwicklungen zu verfolgen.

www.wk-events.at/wko/kitransfer/kiundhumanoiderobotik



Nehmen Sie Kontakt mit uns auf!

Sie möchten sich näher über das Projekt informieren?
Wir freuen uns auf ein Gespräch!

KI*Transfer
Wirtschaftskammer Oberösterreich
sparte.industrie

kitransfer@wkoee.at
05 90909-4220

Die sparte.industrie der Wirtschaftskammer Oberösterreich unterstützt
dieses Projekt organisatorisch und finanziell.

Eigentümer, Herausgeber und Verleger:

WKO Oberösterreich
sparte.industrie
Hessenplatz 3 | 4020 Linz
T +43 590909-4220
wko.at/ooe/industrie

wk/ooe
sparte.industrie

