Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik

WGP-STANDPUNKT

Humanoide Produktionsroboter in der industriellen Produktion



Humanoide Produktionsroboter in der industriellen Produktion – Potenziale, Einsatzfelder und Anforderungen

Die industrielle Produktion steht vor der Herausforderung, steigende Variantenvielfalt und sinkende Losgrößen bei gleichzeitig zunehmendem Fachkräftemangel wirtschaftlich zu bewältigen. Zwischen hochproduktiver, aufgabenspezifischer Automatisierung und flexibler manueller Arbeit besteht dabei eine Automatisierungslücke, für deren Schließung flexibel einsetzbare Produktionsroboter einen möglichen Lösungsansatz darstellen. Ihr Potenzial liegt insbesondere in der Übernahme unterschiedlicher Produktionsaufgaben sowie in der Nutzung bestehender, auf den Menschen ausgelegter Produktionsumgebungen.

Das vorliegende Standpunktpapier führt hierfür den **humanoiden Produktionsroboter (HPR)** als produktionstechnisches Zielbild ein und grenzt ihn von einem primär über seine menschenähnliche Morphologie definierten humanoiden Roboter ab. Der HPR wird funktional und aufgabenorientiert verstanden: Nicht die möglichst vollständige Nachbildung der menschlichen Gestalt bestimmt seine Ausprägung, sondern die für die vorgesehenen Produktionsaufgaben erforderliche Kombination aus körperlichen, insbesondere kinematischen, und intelligenten Fähigkeiten. Diese Eigenschaften können je nach Anwendung unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Eine humanoide Gestaltung ist damit insbesondere dort sinnvoll, wo sie die Nutzung bestehender, für Menschen gestalteter Produktionsinfrastrukturen erleichtert.

Ausgangspunkt der Systemgestaltung ist folglich die Produktionsaufgabe mit ihrer Komplexität und ihren Randbedingungen. Daraus werden zunächst die erforderlichen robotischen Fähigkeiten und anschließend geeignete technische Module und Systemarchitekturen abgeleitet. Für den industriellen Einsatz sind dabei insbesondere Modularität, Adaptierbarkeit und offene Schnittstellen sowie Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit entscheidend. Das Papier empfiehlt deshalb einen modularen, aufgabenorientierten Entwicklungsansatz, eine koordinierte Forschungs- und Standardisierungsagenda sowie die schrittweise Validierung in industriellen Pilotanwendungen. Ziel ist nicht die Entwicklung eines universellen menschenähnlichen Roboters, sondern einer Familie flexibel konfigurierbarer Produktionsroboter, deren technische Ausprägung konsequent aus dem jeweiligen industriellen Anwendungsfall hervorgeht und die jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Produktionsaufgaben ausführen können.

Impressum

Herausgeber
Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. – WGP

Verantwortliche Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl

Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger

Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl

ISSN 2750-4549

Inhalt

Humanoide Produktionsroboter in der industriellen Produktion – Potenziale, Einsatzfelder und Anforderungen....1
Impressum....1

1 Der humanoide Produktionsroboter: Motivation, Zielbild und Anforderungen....1
1.1 Herausforderungen der industriellen Produktion....1
1.2 Der humanoide Produktionsroboter als flexible Automatisierungsplattform....2
1.3 Aufgaben und deren Komplexität....2
1.4 Anforderungen an den humanoiden Produktionsroboter....3

2 Stand der Technik: Humanoide Robotik für die industrielle Produktion....3
2.1 Technologische und strategische Einordnung....4
2.2 Technische, wirtschaftliche und regulatorische Limitierungen....5
2.3 Industrielle Einsatzpotenziale....5

3 Automatisierbare Tätigkeiten und neue Arbeitsteilung in der Produktion....6
4 Technisches Zielbild, Komplexität und Zuverlässigkeit des humanoiden Produktionsroboters....8
4.1 Gestaltungsprinzipien und kinematische Ausprägungen....8
4.2 Manipulation und modulare Gelenkaktuatoren....9
4.3 Sensorik, Rechen- und Steuerungsarchitektur....10
4.4 Modularität und Schnittstellen....11
4.5 Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Produktivität....11

5 Europäische Perspektive und Ökosystem....12
6 Fazit und Handlungsempfehlungen....13
6.1 Forschungsagenda....14
6.2 Standards und Rahmenbedingungen....15
6.3 Pilotanwendungen und Umsetzung....15

Literatur....16

1 Der humanoide Produktionsroboter: Motivation, Zielbild und Anforderungen

1.1 Herausforderungen der industriellen Produktion

Die industrielle Produktion steht vor der Herausforderung, ihre Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit trotz einer abnehmenden Verfügbarkeit qualifizierter Arbeitskräfte zu sichern. Der demografische Wandel und der zunehmende Fachkräftemangel verstärken insbesondere in Produktionsbereichen mit einem hohen Anteil manueller Tätigkeiten den Bedarf nach weiteren Automatisierungslösungen. Automatisierung dient damit nicht mehr ausschließlich der Steigerung von Produktivität und Qualität, sondern zunehmend auch der Sicherung bestehender Produktionskapazitäten [24].

Heutige Automatisierungslösungen stoßen dabei jedoch an technische und wirtschaftliche Grenzen. Konventionelle Systeme weisen insbesondere bei häufig wiederkehrenden Aufgaben, geringen Varianten und klar definierten Prozessbedingungen eine hohe Leistungsfähigkeit auf. Mit zunehmender Variantenvielfalt, sinkenden Losgrößen und häufigeren Produktwechseln steigt dagegen der Aufwand für Vorrichtungen, Zuführtechnik, Sensorik, Programmierung und Inbetriebnahme. Eine technisch mögliche Automatisierung ist unter diesen Bedingungen nicht zwangsläufig wirtschaftlich [25].

Der Mensch bietet demgegenüber eine hohe Flexibilität. Unterschiedliche Tätigkeiten können ohne umfangreiche technische Anpassungen übernommen und Abweichungen innerhalb des Prozesses situationsabhängig behandelt werden. Diese Flexibilität ist jedoch unmittelbar an die Verfügbarkeit von Arbeitskräften gebunden.

Daraus ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen Automatisierungsgrad, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit. Zwischen hochproduktiver, aufgabenspezifischer Automatisierung und flexibler manueller Arbeit besteht eine Automatisierungslücke. Sie umfasst insbesondere Tätigkeiten, die grundsätzlich automatisierbar sind, deren konventionelle Automatisierung aufgrund des erforderlichen Integrationsaufwands jedoch nicht wirtschaftlich umgesetzt werden kann. Besonders ausgeprägt ist diese Lücke in bestehenden, auf den Menschen ausgelegten Produktionsumgebungen (Brownfield), da dort bauliche Anpassungen den Integrationsaufwand konventioneller Automatisierung zusätzlich erhöhen. Auf diesen Fall konzentriert sich das vorliegende Papier.

Zur Schließung dieser Lücke werden Automatisierungssysteme benötigt, die unterschiedliche Tätigkeiten mit möglichst geringem Anpassungsaufwand übernehmen können. Eine solche Plattform muss bestehende Produktionsumgebungen weitgehend nutzen können und gleichzeitig flexibel auf unterschiedliche Aufgaben und Prozessbedingungen reagieren.

1.2 Der humanoide Produktionsroboter als flexible Automatisierungsplattform

Der humanoide Produktionsroboter (HPR) bietet einen möglichen Ansatz für eine solche flexible Automatisierung. Sein Potenzial ergibt sich nicht allein aus seiner menschenähnlichen Gestalt, sondern aus der Kombination von zwei grundlegenden Eigenschaften und der daraus folgenden Aufgabenflexibilität. Diese umfassen eine geeignete Kinematik sowie intelligente und adaptive Fähigkeiten, sodass unterschiedliche Produktionsaufgaben übernommen werden können. Die Eigenschaften sind dabei nicht als binäre Merkmale zu verstehen, sondern können unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Ein HPR muss somit nicht in jeder Dimension eine maximal menschenähnliche Ausprägung aufweisen. Vielmehr ergibt sich seine konkrete Ausprägung aus der Kombination der für die vorgesehenen Produktionsaufgaben erforderlichen kinematischen und intelligenten Fähigkeiten. Ein höherer Grad an Menschenähnlichkeit ist dabei nicht grundsätzlich vorteilhaft; er ist anhand der konkreten Anforderungen der Aufgabe zu bewerten. Der Autonomiegrad wirkt sich dagegen ebenso wie der Inbetriebnahmeaufwand unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes aus. Unter der körperlichen Ausprägung wird dabei die gesamte physische Gestalt eines HPR verstanden, unter seiner Kinematik deren Bewegungsstruktur.

Die **Kinematik** ermöglicht die Interaktion mit vorhandenen Arbeitsplätzen, Maschinen und Betriebsmitteln. Viele Produktionsumgebungen wurden ursprünglich für Menschen ausgelegt. Arbeitsräume, Werkzeuge, Bediengeräte und Materialbereitstellungen orientieren sich entsprechend an menschlichen Abmessungen und Fähigkeiten. Eine menschenähnliche Kinematik kann es ermöglichen, diese Infrastruktur ohne umfangreiche Anpassungen weiterzuverwenden.

Die **Intelligenz** eines HPRs ermöglicht den Umgang mit variierenden Situationen. Das System muss relevante Zustände seiner Umgebung erkennen und sein Verhalten innerhalb definierter Grenzen anpassen können. Mit steigender Variabilität einer Aufgabe nehmen die Anforderungen an Wahrnehmung, Entscheidungsfindung und den Umgang mit Abweichungen zu.

Aus dem Zusammenspiel von Kinematik und Intelligenz folgt die Flexibilität hinsichtlich der **Aufgaben**. Ein wesentlicher Vorteil eines flexiblen Produktionsroboters entsteht dann, wenn dieselbe Plattform unterschiedliche Tätigkeiten übernehmen kann. Der Wechsel zwischen Aufgaben sollte dabei mit deutlich geringerem Aufwand verbunden sein als die Implementierung einer jeweils eigenständigen Automatisierungslösung. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die folgende Definition:

> *Ein HPR ist ein robotisches System, optimiert für die industrielle Produktionsumgebung, das je nach Aufgabe menschenähnliche körperliche Merkmale wie Arme, Greifsysteme oder Hände, Rumpf, sensorische Einheiten und eine mobile Fortbewegung aufweisen kann. Er besitzt eine Intelligenz zur Entscheidungsfindung, sodass er selbständig auf unterschiedliche Situationen reagieren kann. Daraus folgt die Fähigkeit, ein breites Spektrum variabler Produktionsaufgaben zu übernehmen, die bisher typischerweise von Menschen ausgeführt werden.*

Die humanoide Ausprägung stellt dabei keinen Selbstzweck dar. Ihr Nutzen liegt insbesondere in der Möglichkeit, bestehende und auf Menschen ausgerichtete Produktionsinfrastrukturen weiterzuverwenden. Der wirtschaftliche Vorteil eines HPR entsteht somit nicht ausschließlich durch eine hohe Leistungsfähigkeit bei einer einzelnen Tätigkeit, sondern insbesondere durch seine Wiederverwendbarkeit für unterschiedliche Aufgaben und Einsatzorte.

1.3 Aufgaben und deren Komplexität

Für die Bewertung des Einsatzpotenzials eines HPR ist die Betrachtung einzelner Tätigkeiten geeigneter als die Betrachtung vollständiger Berufsbilder. Berufe umfassen unterschiedliche Tätigkeiten, die sich hinsichtlich ihrer Anforderungen und ihres Automatisierungspotenzials deutlich unterscheiden können.

Produktionsnahe Tätigkeiten lassen sich in sechs grundlegende Aufgabenbereiche einordnen. Dazu gehören Transport und Logistik, Fertigung und Maschinenbedienung, Montage und Demontage, Qualitätssicherung und Prüfung, Rüsten und Einrichten sowie Instandhaltung und Entstörung.

Die Zugehörigkeit zu einem Aufgabenbereich erlaubt jedoch noch keine Aussage über die Automatisierbarkeit einer Tätigkeit. Innerhalb eines Bereichs können Aufgaben mit sehr unterschiedlichen Anforderungen auftreten. In der Montage unterscheidet sich beispielsweise das Verschrauben starrer Bauteile an definierter Position deutlich vom Verlegen biegeschlaffer Teile wie Kabelbäume.

Zur Bewertung des Automatisierungspotenzials muss deshalb zusätzlich die Komplexität einer Aufgabe berücksichtigt werden. Diese wird insbesondere durch die Struktur und Variabilität der Umgebung, die Anforderungen an Manipulation und Wahrnehmung sowie den erforderlichen Anteil an Entscheidungen und situationsabhängigen Anpassungen bestimmt. Mit zunehmender Komplexität steigen auch die Anforderungen an den Umgang mit Abweichungen und Störungen.

Auf dieser Grundlage können Produktionsaufgaben vereinfacht in drei Komplexitätsstufen eingeordnet werden. Die **erste** Stufe umfasst strukturierte und repetitive Aufgaben mit weitgehend bekannten Objekten und standardisierten Abläufen. Beispiele sind einfache Transportaufgaben oder eine standardisierte Maschinenbeschickung.

Die **zweite** Stufe umfasst variable und adaptive Aufgaben. Objektpositionen, Varianten oder Prozesszustände können sich verändern und müssen vom Robotersystem erkannt und berücksichtigt werden. Hierzu können beispielsweise flexible Montageaufgaben, variantenreiche Maschinenbeschickungen oder Prüfprozesse zählen.

Die **dritte** Stufe umfasst wenig strukturierte und hoch adaptive Aufgaben. Anders als in den ersten beiden Stufen lässt sich ein wesentlicher Teil der auftretenden Situationen nicht im Voraus beschreiben. Neben komplexer Wahrnehmung und Manipulation sind situationsabhängige Entscheidungen und eine eigenständige Reaktion auf Abweichungen erforderlich. Typische Beispiele finden sich insbesondere bei komplexen Instandhaltungs- und Entstörungsaufgaben. Quer zu allen drei Stufen sind neben den Anforderungen an die Arbeitssicherheit insbesondere die einzuhaltenden Toleranzen und die erforderliche Erfolgsrate zu berücksichtigen. Sie können den technischen und wirtschaftlichen Aufwand in jeder Stufe deutlich erhöhen.

Die Kombination aus Aufgabenbereich und Aufgabenkomplexität ermöglicht damit eine systematische Einordnung möglicher Einsatzfelder. Für einen wirtschaftlichen Einsatz eines HPR sind zunächst insbesondere Tätigkeiten interessant, die ausreichend variabel sind, sodass eine konventionelle Automatisierung mit hohem Aufwand verbunden wäre, deren Komplexität gleichzeitig aber einen zuverlässigen robotischen Betrieb ermöglicht. Eine praxisorientierte Hilfestellung für die Zuordnung von Aufgaben zu den erforderlichen Fähigkeiten humanoider Roboter bietet beispielsweise der Humanoid Capabilities Navigator des Fraunhofer IPA [45].

1.4 Anforderungen an den HPR

Aus den betrachteten Aufgaben und deren Komplexität lassen sich grundlegende Anforderungen an einen HPR ableiten. Das System muss zunächst flexibel und aufgabenübergreifend einsetzbar sein. Neue Tätigkeiten sollten mit begrenztem Engineeringaufwand eingerichtet werden können. Bereits vorhandene Fähigkeiten und Komponenten sollten für weitere Anwendungen wiederverwendbar sein.

Darüber hinaus ist eine menschenähnliche Kinematik und Manipulationsfähigkeit erforderlich, damit vorhandene Arbeitsräume, Werkzeuge und Betriebsmittel möglichst ohne grundlegende Anpassungen genutzt werden können.

Eine weitere zentrale Anforderung ist die situationsabhängige Wahrnehmung und Anpassungsfähigkeit. Das System muss Objekte, Prozesszustände und Umgebungsbedingungen erkennen und seine Handlungen an unterschiedliche Ausgangssituationen anpassen können. Mit steigender Aufgabenkomplexität gewinnt zusätzlich die Fähigkeit zur Erkennung und Behandlung von Abweichungen an Bedeutung.

Neben diesen funktionalen Fähigkeiten muss ein HPR die Anforderungen des industriellen Betriebs erfüllen. Hierzu gehören insbesondere Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Reproduzierbarkeit, Wartbarkeit und Sicherheit. Gleichzeitig muss die Integration in bestehende Maschinen und Produktionssysteme möglich sein.

Schließlich ist die Wirtschaftlichkeit entscheidend. Ein HPR muss nicht in jeder einzelnen Tätigkeit die Produktivität einer speziell entwickelten Automatisierungslösung erreichen. Sein Potenzial ergibt sich vielmehr aus der Kombination mehrerer Aufgaben, einer hohen Wiederverwendbarkeit und einem geringen Aufwand für die Anpassung an neue Anwendungen.

Damit ergibt sich als Zielbild kein universeller humanoider Roboter, der sämtliche menschlichen Tätigkeiten übernimmt. Im Mittelpunkt steht ein flexibel einsetzbares und industriell robustes Robotersystem, dessen Fähigkeiten gezielt aus relevanten Produktionsaufgaben abgeleitet werden. Die hier identifizierten Anforderungen bilden die Grundlage für die Betrachtung der technologischen Fähigkeiten

sowie für die geeigneten Einsatzbereiche und das technische Zielbild in den nachfolgenden Kapiteln.

2 Stand der Technik: Humanoide Robotik für die industrielle Produktion

Die humanoide Robotik verspricht das Potenzial, die industrielle Automatisierung durch den Einsatz anthropomorpher General-Purpose-Systeme zu erweitern [48]. Dabei bezeichnet die humanoide Ausprägung die körperliche Gestaltung und Bewegungsweise eines Roboters, während die Bezeichnung als General-Purpose-System auf dessen Fähigkeit zur Ausführung unterschiedlicher funktionaler Aufgaben abzielt. Gemäß DIN EN ISO 8373 wird ein humanoider Roboter spezifisch durch seinen menschenähnlichen Aufbau, bestehend aus Körper, Kopf und Gliedmaßen, sowie durch sein menschenähnliches Erscheinungsbild und Bewegungsverhalten definiert [1]. Er soll in der Lage sein, innerhalb einer für Menschen konzipierten Umgebung Aufgaben auszuführen, ohne dass diese entsprechend angepasst werden müssen [2]. Dies setzt unter anderem Mechanismen zur adaptiven Navigation und Handhabung voraus, die es ermöglichen, auf veränderliche Umgebungsbedingungen zu reagieren [3].

In der aktuellen Phase zeigt sich jedoch eine signifikante Diskrepanz zwischen den in Demonstrationen erzielten Ergebnissen und der für den produktiven Einsatz erforderlichen Robustheit. Dadurch sind insbesondere die industrielle Einsatzreife und die Leistungsfähigkeit gegenüber etablierten, auf einzelne Aufgaben optimierte Robotersystemen kritisch zu hinterfragen. Für die Einordnung des aktuellen Stands der Technik ist es daher nicht allein entscheidend, ob humanoide Roboter zukünftig einzelne industrielle Aufgaben prinzipiell ausführen können. Vielmehr ist zu analysieren, inwieweit sie diese unter realen Produktionsbedingungen robust, sicher und wirtschaftlich bewältigen können. Gerade die Arbeitssicherheit stellt hierbei eine große Herausforderung dar [4].

2.1 Technologische und strategische Einordnung

Das globale Interesse an humanoiden Robotern ist in den letzten Jahren massiv gestiegen [46], [47]. Insbesondere China und die USA nehmen durch eine hohe Dichte an spezialisierten Start-ups und eine schnelle Implementierungsgeschwindigkeit eine führende Rolle ein [5]. Deutschland belegt in diesem Wettbewerbsumfeld derzeit den fünften Platz, und liegt damit noch hinter Indien und dem Vereinigten Königreich [6]. Während die traditionelle Robotik primär auf regelbasierten und deterministischen Programmieransätzen basiert, sollen heute leistungsfähige KI-Modelle eine wesentliche Grundlage für die Wahrnehmung, Entscheidungsfindung und Bewegungsplanung von humanoiden Robotern bilden. Ein flächendeckender industrieller Einsatz wurde jedoch bisher noch nicht realisiert. Vielmehr dominieren isolierte Pilotphasen, primär innerhalb der Automobilindustrie und Logistik [2]. Erste Ansätze finden sich beispielsweise bei BMW (siehe Abbildung 1), bei Mercedes-Benz (mit Apollo) sowie bei GXO Logistics (mit Reflex), wobei vor allem repetitive, teilweise ergonomisch belastende Aufgaben im Fokus stehen [7]. Während sich China auf den Aufbau einer skalierbaren Lieferkette wichtiger Komponenten für humanoide Roboter fokussiert, konzentrieren sich die USA auf die Entwicklung von KI- und Robotiktechnologien. Europa setzt dagegen auf kollaborative Robotik, die Sicherheit und Effizienz verbessern soll, statt Arbeitskräfte zu ersetzen [2].

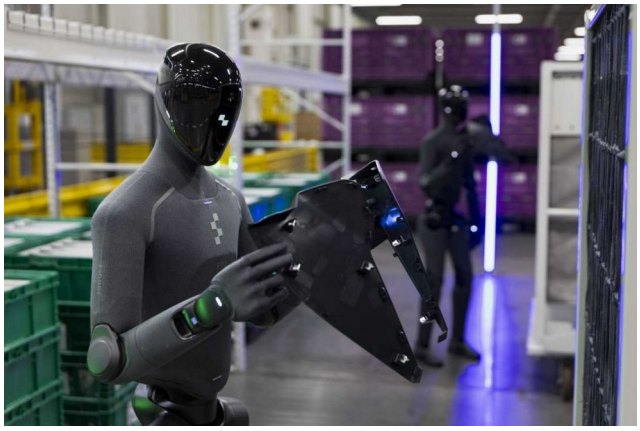


Abbildung 1. Der humanoide Roboter Figure 03 sortiert Bauteile in der Produktionslogistik des BMW Group Werks Spartanburg. Bildnachweis: BMW Group, entnommen aus [42].

Die technologische Entwicklung bewegt sich konsequent weg von starr auf eine Aufgabe zugeschnittenen Systemen hin zu flexiblen Plattformen, die auch in Kollaboration mit dem Menschen agieren sollen. Dabei ist jedoch hervorzuheben, dass noch große Hürden bei der Umsetzung von Mensch-Roboter-Kollaborationen bestehen, insbesondere hinsichtlich Sicherheitsfunktionen und Performance [4]. Die geforderte Intelligenz (Kontextbewusstsein und Handlungsfähigkeit) soll durch die Integration von KI in physische Systeme entstehen, sogenannte Embodied bzw. Physical AI. Dabei wird angestrebt, eine Verknüpfung von Wahrnehmung, Aktion und Lernen direkt mit dem physischen Systemverhalten zu erreichen [8].

Die Entwicklung humanoider Roboter beruht meist auf der Kombination mehrerer Schlüsseltechnologien: der physischen Strukturschicht (Aktuatoren, mechanische Komponenten), der Perzeptions- und Kognitionsschicht (Computer Vision, taktile Sensorik, Umgebungsmodellierung), der Steuerungs- und Lokomotionsschicht (klassische Regelungsverfahren, optimierungsbasierte Methoden, KI-gestützte Bewegungsplanung, Bewegungssteuerung) sowie der Interaktionsschicht (Sprachverarbeitung, Mensch-Roboter-Interaktion). Gerade die Kombination dieser Technologien macht humanoide Systeme komplex. Ein Roboter kann eine Aufgabe nicht allein deshalb zuverlässig ausführen, weil er über leistungsfähige KI-Modelle verfügt [9].

Hinsichtlich der Kinematik ermöglichen leichtere und robustere Materialien, sowie miniaturisierte Komponenten kompaktere und leistungsfähigere Aufbauten. Durch Verwendung taktiler Sensoren sowie Kraft-Drehmoment-Sensoren sollen beispielsweise Greifer präziser gesteuert werden können [2]. Dabei sind die heute eingesetzten Sensoren der menschlichen Haptik aber noch weit unterlegen. Für einen Vergleich mit der menschlichen Präzision bedarf es

daher noch enormen Fortschritten hinsichtlich Datenverarbeitung und Sensorentwicklung [4].

Technologien wie Simultaneous Localization und Mapping (SLAM) und der Einsatz von Light Detection and Ranging (LIDAR) Systemen sollen es humanoiden Robotern ermöglichen, sich selbstständig in komplexen Umgebungen zurechtzufinden. KI-Modelle wie Vision-Language-Action-Modelle (VLAs) werden primär dazu eingesetzt, aus Daten zu lernen und angemessen auf unterschiedliche Prozesszustände, neue Umgebungen oder neue Anweisungen zu reagieren. Zudem werden Methoden des Imitation-Learning eingesetzt, wodurch humanoide Roboter direkt durch Beobachtung von Menschen lernen sollen [2]. Neben Demonstrationen ist insbesondere für die Lokomotion das Training in der Simulation entscheidend. Die Modellarchitektur ist dabei noch nicht gefestigt; neben VLAs werden auch World-Action-Modelle diskutiert.

Die ökonomische Attraktivität der menschenähnlichen Gestalt humanoider Roboter resultiert primär aus der Möglichkeit der sogenannten Brownfield-Automatisierung. Hierbei sollen humanoide Roboter in bestehende Betriebsstätten implementiert werden. Dadurch soll sich der Bedarf an infrastrukturellen Anpassungen wie Bodenmarkierungen oder physischen Einzäunungen potenziell reduzieren lassen, da das System die für Menschen konzipierte Infrastruktur nutzt [2]. Entscheidend für die industrielle Relevanz ist jedoch nicht allein die technologische Fähigkeit zur flexiblen Aufgabenbewältigung, sondern deren zuverlässige und wirtschaftliche Umsetzung unter realen Produktionsbedingungen. Eigenschaften humanoider Roboter, wie Zykluszeit, Verfügbarkeit, Energieeffizienz, Sicherheit, Wartungsaufwand und Gesamtkosten müssen daher mit etablierten Automatisierungslösungen sowie der menschlichen Arbeitsleistung verglichen werden, um deren tatsächlichen industriellen Mehrwert bewerten zu können. Maßstab ist dabei die über den Lebenszyklus bilanzierte Produktivität (Abschnitt 4.5).

2.2 Technische, wirtschaftliche und regulatorische Limitierungen

Trotz der genannten Potenziale bestehen signifikante technische, wirtschaftliche und regulatorische Herausforderungen, die das Zielbild eines humanoiden Roboters für die Produktion einschränken. Unter dem Leitsatz „Form follows function“ wird kritisiert, dass die menschliche Morphologie für viele hochpräzise oder stark repetitive industrielle Aufgaben nicht optimal geeignet ist [10]. In Bezug auf Geschwindigkeit, Wiederholgenauigkeit und Zuverlässigkeit bleiben klassische Industrieroboter mit deutlich geringerer Gelenkzahl bei entsprechend spezialisierten Aufgaben überlegen, da sie über wesentlich einfachere und stabilere Steuerungsschemata verfügen.

Ein fundamentales technologisches Limit stellt auch die Energieversorgung dar. Aktuelle Systeme erreichen etwa zwei bis vier Stunden je Ladezyklus, einzelne wechseln den Akku selbstständig [5]. Für den durchgehenden Schichtbetrieb reicht das weiterhin nicht aus. Die effektive Einsatzdauer lässt sich jedoch durch Zwischenladen während stationärer Arbeitsphasen verlängern (vgl. Abschnitt 4.5). Zusätzlich limitiert die hohe Rechenlast von KI-Modellen, wie beispielsweise Large-Language-Modellen (LLMs), die lokale Ausführung auf Bordcomputern, da die notwendige GPU-Leistung oft im Widerspruch zur Batteriekapazität und zum thermischen Management steht [9]. Gerade das thermische Management erweist sich in der praktischen Erprobung als besonders relevanter Faktor. Auch die menschenähnliche Optik kann die Akzeptanz bei Menschen durch das „Uncanny Valley“-Phänomen mindern und zu einer generellen Ablehnungshaltung gegenüber Robotersystemen führen [4]. Darüber hinaus ist kritisch zu prüfen, ob die menschenähnliche Gestalt und Handlungsweise für die jeweilige Aufgabe tatsächlich einen Mehrwert bietet oder ob geeignetere Automatisierungslösungen verfügbar sind.

Die Arbeitssicherheit stellt eine weitere zentrale Hürde für den industriellen Einsatz dar. Humanoide Roboter können bei Kollisionen hohe Kräfte ausüben, was die zulässigen Grenzwerte für kollaborative Robotik bei weitem übersteigt. Aufgrund der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften, wie Sicherheitszertifizierungen und Zuverlässigkeitsprüfungen, stehen humanoide Roboter im Hinblick auf ihren möglichen industriellen Einsatz vor großen Herausforderungen. Zum einen müssen gesetzliche Vorschriften (z. B. ISO 10218 und IEC 61508) eingehalten werden, wobei die Sicherheitszertifizierung 12 bis 18 Monate in Anspruch nehmen kann. Zum anderen muss für den kommerziellen Einsatz eine mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen (MTFE) von mehr als 10.000 Betriebsstunden nachgewiesen werden, was deutlich über dem Wert für Prototypen (100-1.000 Betriebsstunden) liegt [9].

Neben den beschriebenen physischen Sicherheitsanforderungen müssen ebenfalls Aspekte wie Cybersicherheit, IT-Sicherheit sowie Datenschutz berücksichtigt werden. Hier fehlt es aktuell an einem übergreifenden Regulierungs- und Sicherheitsrahmen für humanoide Roboter, weshalb primär auf bestehende Normen zurückgegriffen wird. Hinzu kommt die Integrität der verarbeiteten Daten. Lernende Systemanteile leiten ihr Verhalten unmittelbar aus Sensor- und Prozessdaten ab. Fehlerhafte oder unbemerkt veränderte Daten können daher sicherheitsrelevantes Fehlverhalten auslösen. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Herkunft von Trainings- und Betriebsdaten bislang selten lückenlos dokumentieren lässt. Für Sicherheitsnachweise und für die Analyse von Zwischenfällen ist eine solche Nachvollziehbarkeit jedoch erforderlich. Gerade der Einsatz bildverarbeitender Sensoren in Kombination mit KI-Modellen, wie beispielsweise Vision-Language-Modellen (VLMs) oder LLMs, erhöht die notwendigen sicherheitstechnischen und regulatorischen Anforderungen deutlich [9]. Die kontinuierliche Erfassung, Verarbeitung und mögliche Weitergabe personenbezogener oder sensibler Daten ist hinsichtlich der EU-Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) kritisch zu bewerten. Aktuelle Verordnungen, wie der Cyber Resilience Act (2024/2847), der AI Act (2024/1689) und die EU-Maschinenverordnung (2023/1230) [40], zielen darauf ab, regulatorische Rahmenbedingungen zu schaffen. Angesichts der hohen Innovationsgeschwindigkeit besteht jedoch weiterhin die Herausforderung,

regulatorische Vorgaben und Normen kontinuierlich an neue technologische Entwicklungen anzupassen.

2.3 Industrielle Einsatzpotenziale

Das Einsatzpotenzial eines humanoiden Roboters hängt unmittelbar von der vorliegenden Aufgabenkomplexität ab. Langfristig wird dabei die Fähigkeit angestrebt, dynamisch auf unstrukturierte Umgebungen und variable Güter reagieren zu können. Eine zuverlässige Umsetzung dieser Fähigkeit erscheint jedoch aktuell herausfordernd. Für die Produktion wird zwar das Potenzial einer agilen Fertigung, insbesondere in der Montage, Verpackung und allgemeinen Materialbereitstellung, gesehen, eine wirtschaftlich und technisch robuste Umsetzung besteht aktuell jedoch nicht. Erste Pilotversuche bei Unternehmen wie GXO Logistics oder BMW zeigen zwar mögliche Einsatzfelder, behandeln bislang jedoch überwiegend einfache Anwendungsszenarien. Bei der Bewertung möglicher industrieller Einsatzpotenziale sollte daher stets geprüft werden, ob für die jeweilige Anwendung nicht konventionelle Systeme, beispielsweise Einarm-Roboter, besser geeignet sind.

Ergebnisse einer vorliegenden Fraunhofer IPA-Studie bestätigen die Differenzierung nach Komplexitätsstufen. Während die Befragten eine höhere Eignung für einfache Aufgaben wie den Materialtransport (84 %) und die Maschinenbeladung (79 %) sowie für das Greifen komplexer Gegenstände (62 %) nennen, sinkt die attestierte Eignung für Montagearbeiten (35 %) und Inspektion (22 %) signifikant. Bei deutlich komplexeren, prozesskritischen Aufgaben wie dem Schweißen, wird dem humanoiden Roboter lediglich eine Eignung von 4 % zugeschrieben [11].

3 Automatisierbare Tätigkeiten und neue Arbeitsteilung in der Produktion

Die in Abschnitt 1.1 beschriebene Automatisierungslücke lässt sich nicht allein über die technische Leistungsfähigkeit robotischer Systeme schließen. Ob ein HPR wirtschaftlich tragfähig eingesetzt werden kann, hängt zusätzlich davon ab, wie Tätigkeiten zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt werden. Die Aufgabenbereiche und Komplexitätsstufen aus Abschnitt 1.3 beschreiben, welche Tätigkeiten grundsätzlich automatisierbar erscheinen. Für die industrielle Umsetzung ist darüber hinaus zu klären, welche Rollen beide Partner übernehmen und wie sich die verbleibende menschliche Arbeit dadurch verändert. Dieses Kapitel ordnet diese Fragen den Aufgabenbereichen zu. Daraus werden Einsatzszenarien abgeleitet, deren technische Fähigkeitsanforderungen in Kapitel 4 konkretisiert werden.

3.1 Mensch-Roboter-Rollen

Die Diskussion um humanoide Roboter verengt die Arbeitsteilung häufig auf die vollständige Substitution menschlicher Arbeit. Aus produktionstechnischer Sicht ist diese Betrachtung unvollständig. Zwischen vollständiger Übernahme einer Tätigkeit und reiner Assistenz liegt ein Spektrum von Rollenverteilungen, die sich in ihren technischen und organisatorischen Anforderungen deutlich unterscheiden.

Für die Produktion lassen sich vier Rollenmodelle unterscheiden. Bei der Substitution übernimmt der Roboter eine abgegrenzte Tätigkeit vollständig. Die Verantwortung für den Prozess bleibt beim Menschen. Bei der Assistenz führt der Mensch die Aufgabe aus, während der Roboter belastende Teilschritte wie Halten, Positionieren oder Transportieren übernimmt. Bei der Kollaboration bearbeiten Mensch und Roboter dieselbe Aufgabe im gemeinsamen Arbeitsraum. Diese Rolle stellt die höchsten Anforderungen an Sicherheit und Zustandsüberwachung. Bei der angeleiteten Ausführung übernimmt der Roboter die Handlung, während der Mensch Zielzustände vorgibt und im Fehlerfall eingreift [17], [18], [19], [52]. Darüber hinaus können Mitarbeitende dem Roboter neue Aufgaben demonstrieren oder an der Erhebung anwendungsspezifischer Trainingsdaten mitwirken. Ergänzend gewinnt die Teleoperation an Bedeutung, bei der Beschäftigte den Roboter aus der Ferne, etwa von einem anderen Standort aus, steuern. Sie eröffnet neue Formen der Arbeitsorganisation, stellt aber hohe Anforderungen an Kommunikation, Latenz und Sicherheit.

Die Zuordnung der Rollen folgt der Aufgabenkomplexität nach Abschnitt 1.3. Strukturierte und repetitive Aufgaben der ersten Komplexitätsstufe eignen sich für eine Substitution. Variable und adaptive Aufgaben der zweiten Stufe erfordern eine geteilte Ausführung, bei der die situationsabhängige Entscheidung zunächst beim Menschen verbleibt. Für wenig strukturierte Aufgaben der dritten Stufe erscheint aus heutiger Sicht nur die angeleitete Ausführung realistisch.

Die Rollenverteilung ist dabei nicht statisch. Sie kann sich abhängig von der Leistungsfähigkeit des Roboters in unterschiedlichen Zuständen sowie vom Umfang und von der Qualität der Trainingsdaten verschieben. Die Gestaltung des Arbeitssystems sollte deshalb eine schrittweise Verschiebung dieser Grenze zulassen, ohne den Arbeitsplatz jeweils neu auslegen zu müssen. Erforderlich sind hierfür klar beschriebene Übergabepunkte zwischen Mensch und Roboter. Solche Übergaben betreffen sowohl das Werkstück als auch die Verantwortung für den Prozesszustand [7].
Parallel dazu werden derzeit spezifische Sicherheitsnormen für humanoide Roboter erarbeitet. Im Normungsgremium ISO/TC 299 erarbeitet die WG 12 mit ISO/CD 25785-1 Anforderungen an Roboter, die sich wie zweibeinige Humanoide aktiv ausbalancieren müssen (dynamically stable industrial mobile robots); eine Veröffentlichung ist voraussichtlich für 2028 geplant. Für die in Abschnitt 4.1 bevorzugte, statisch stabile Radplattform ist die ebenfalls in Erarbeitung befindliche ISO/WD 26058-1 für industrielle mobile Roboter einschlägig. Ein konsolidierter normativer Rahmen liegt bislang nicht vor. Für Hersteller wie für Anwender verbleibt daher ein erheblicher Entwicklungs- und Validierungsaufwand, bis ein normkonformer Betrieb im geteilten Arbeitsraum nachgewiesen werden kann [44].

3.2 Wertigkeit der auszuführenden Arbeit

Die Automatisierbarkeit einer Tätigkeit sagt nichts über deren Wertigkeit für die ausführende Person aus. Beide Kriterien sind unabhängig voneinander zu bewerten. Als Wertigkeit wird im Folgenden verstanden, welchen Handlungsspielraum, welche Vollständigkeit und welche Lernhaltigkeit eine Tätigkeit aufweist. Diese Merkmale sind in der Arbeitswissenschaft etabliert und lassen sich auf robotisierte Arbeitssysteme übertragen [7].

Ein erheblicher Teil der heute manuell ausgeführten Produktionstätigkeiten ist monoton, ergonomisch belastend oder zeitlich stark gebunden. Sie entsprechen weitgehend den in der Robotik als „dull, dirty, dangerous" bezeichneten Tätigkeiten. Die Übernahme dieser Tätigkeiten durch einen HPR wirkt entlastend und erhöht die Wertigkeit der verbleibenden Arbeit. Dies gilt insbesondere für Lastenhandhabung, Zwangshaltungen sowie wiederkehrende Greif- und Positionieraufgaben.

Eine einseitige Aufteilung kann jedoch den umgekehrten Effekt haben. Werden bevorzugt jene Teilschritte automatisiert, die sich technisch einfach abbilden lassen, verbleiben beim Menschen möglicherweise fragmentierte Restaufgaben. Zusammenhängende Tätigkeiten zerfallen dann in Überwachungs- und Zuarbeitsschritte ohne erkennbaren Handlungsspielraum. Als Folge sinken die Qualifikationsanforderungen und mit ihnen die Arbeitszufriedenheit. Diese Gefahr besteht besonders bei Teilautomatisierung mit hoher Taktbindung.

Die Wertigkeit ist deshalb als Gestaltungsziel und nicht nur als Bewertungskriterium zu verstehen. Bei der Auslegung eines Arbeitssystems sollte geprüft werden, ob dem Menschen nach der Automatisierung eine vollständige Tätigkeit mit eigenem Entscheidungsanteil verbleibt. Geeignete Ansatzpunkte sind die Bündelung planender und prüfender Anteile sowie die Übertragung von Verantwortung für mehrere Arbeitsplätze. Ein HPR kann diese Aufwertung unterstützen, wenn er ausführende und körperlich belastende Anteile übernimmt und die Bewertung des Prozessergebnisses beim Menschen belässt.

3.3 Qualifikation

Mit der veränderten Arbeitsteilung entstehen neue Tätigkeitsinhalte. Der Betrieb eines HPR erfordert Rüsten, Anlernen, Überwachen und Instandhaltung. Diese Anteile treten an die Stelle der bisher unmittelbar ausgeführten Handhabungs- und Montagetätigkeiten. Der Qualifizierungsbedarf betrifft damit nicht nur einzelne Fachkräfte, sondern die Breite der Produktionsbelegschaft sowie die IT.

Drei Zielgruppen lassen sich unterscheiden. Produktionsmitarbeitende benötigen Kompetenzen für die tägliche Zusammenarbeit, für die Bewertung von Systemzuständen und perspektivisch für das Anlernen wiederkehrender Abläufe, das derzeit überwiegend bei Experten und Integratoren liegt. Instandhaltungspersonal benötigt Kenntnisse zur Diagnose, zum Austausch von Modulen und zur Wiederinbetriebnahme. Planung und Integration benötigen Kompetenzen zur Zuordnung von Produktionsaufgaben zu Fähigkeitsprofilen sowie zur Bewertung von Sicherheits- und Verfügbarkeitsanforderungen.

Eine besondere Anforderung ergibt sich aus dem Einsatz lernender Systemanteile. Deren Verhalten ist nicht in jeder Situation vollständig vorhersehbar. Beschäftigte müssen deshalb einschätzen können, wie sicher eine Wahrnehmung oder eine Aufgabeninterpretation ist. Hierfür sind verständlich dargestellte Unsicherheitsangaben und klar definierte Rückfallebenen erforderlich. Der in Abschnitt 6.2 beschriebene Standardisierungsbedarf zur Beschreibung von Unsicherheit wirkt damit unmittelbar auf die Qualifizierung.

Die Qualifizierung sollte bereits vor der technischen Einführung beginnen und diese begleiten, nicht erst nach der Inbetriebnahme erfolgen. Erfahrungen aus der kollaborativen Robotik deuten darauf hin, dass eine frühe Beteiligung der Beschäftigten die Akzeptanz erhöht [7]. Sie verkürzt zudem die Zeit bis zum stabilen Betrieb. Zielbild ist eine Kompetenzentwicklung, die über die reine Bedienung hinausgeht.

3.4 Einsatzszenarien

Einsatzszenarien lassen sich systematisch aus drei Merkmalen ableiten. Das erste Merkmal ist der Aufgabenbereich nach Abschnitt 1.3. Das zweite Merkmal ist die Aufgabenkomplexität. Das dritte Merkmal ist die Umgebungsbedingung, insbesondere die Unterscheidung zwischen bestehenden Produktionsumgebungen und neu geplanten Arbeitsplätzen.

Vorliegende Bewertungen bestätigen die Abhängigkeit von der Komplexität. In der in Abschnitt 2.3 dargestellten Befragung des Fraunhofer IPA schreiben die Teilnehmenden einfachen Aufgaben wie dem Materialtransport und der Maschinenbeladung eine deutlich höhere Eignung zu als Montage- und Inspektionsaufgaben. Für prozesskritische Tätigkeiten fällt die Bewertung nochmals deutlich geringer aus [11]. Diese Angaben beruhen auf Einschätzungen und nicht auf Messergebnissen. Sie stützen jedoch die Priorisierung einfacher und mittlerer Komplexitätsstufen für erste Anwendungen.

Der Nutzen eines HPR entsteht insbesondere in bestehenden Produktionsumgebungen. Dort sind Arbeitsräume, Werkzeuge und Bedienelemente an menschliche Abmessungen angepasst. Eine menschenähnliche Kinematik erlaubt die Nutzung dieser Infrastruktur ohne umfangreiche Anpassungen. In neu geplanten Umgebungen ist dieser Vorteil geringer, da dort konventionelle Automatisierungslösungen wirtschaftlich meist überlegen sind.

Aus dieser Systematik ergeben sich folgende vorrangige Einsatzszenarien:

- Flexible Materialbereitstellung und innerbetrieblicher Transport bei wechselnden Zielorten.
- Maschinenbeladung und Bedienung bei geringen Losgrößen und häufigem Produktwechsel.
- Kommissionierung und Vormontage bei hoher Variantenvielfalt.

- Bestückung, Handhabung und Prüfung mit adaptiven Ausführungsanteilen.
- Rüsten, Warten und einfache Eingriffe in schwer zugänglichen oder ergonomisch belastenden Bereichen.

Diese Szenarien verbinden zwei Eigenschaften. Sie weisen einen erkennbaren betrieblichen Bedarf auf und sie erfordern keine vollständige Autonomie. Beide Merkmale sind Voraussetzung für eine belastbare Bewertung im industriellen Betrieb.

Die beschriebenen Szenarien bilden zusammen mit den Rollenmodellen und den Anforderungen an Wertigkeit und Qualifikation die Grundlage für die technische Ableitung. Aus ihnen ergeben sich die erforderlichen robotischen Fähigkeiten. Deren technische Umsetzung und die damit verbundenen Zielkonflikte werden in Kapitel 4 behandelt.

4 Technisches Zielbild, Komplexität und Zuverlässigkeit des humanoiden Produktionsroboters

Das technische Zielbild des humanoiden Produktionsroboters (HPR) wird in diesem Papier nicht als ein bestimmtes Robotermodell verstanden. Maßgeblich ist eine durchgängige Ableitungslogik. Ausgangspunkt ist die zu automatisierende Produktionsaufgabe mit ihrer Komplexität und ihren Randbedingungen. Daraus werden die erforderlichen robotischen Fähigkeiten bestimmt. Erst anschließend werden diesen Fähigkeiten technische Module und eine Systemarchitektur zugeordnet. Die gewählte Architektur ist abschließend hinsichtlich Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu validieren.

Das Kapitel beschreibt daher Gestaltungsprinzipien, technische Zielkonflikte und Anforderungen an das Gesamtsystem. Es legt bewusst keinen einheitlichen Aufbau fest. Die WGP grenzt sich damit von der verbreiteten Vorgehensweise ab, zunächst einen humanoiden Roboter zu entwickeln und erst danach nach Einsatzfeldern zu suchen. Diese Vorgehensweise ist häufig mit dem Versprechen verbunden, ein einziges System für nahezu alle Aufgaben zu entwickeln und dadurch erhebliche Skaleneffekte zu erzielen. Ob sich dieses Versprechen einlösen lässt, ist derzeit offen. Die produktionstechnisch tragfähige Frage lautet umgekehrt, welche Produktionsaufgabe automatisiert werden soll und welche robotischen Fähigkeiten dafür tatsächlich erforderlich sind.

4.1 Gestaltungsprinzipien und kinematische Ausprägungen

Der Begriff des HPR wird im vorliegenden Papier funktional und nicht morphologisch verstanden. Er bezeichnet kein fest definiertes Körperdesign. Maßgeblich ist nicht die möglichst genaue Nachbildung der menschlichen Gestalt, sondern die Fähigkeit, in einer für den Menschen gestalteten Produktionsumgebung ohne bauliche Anpassung zu arbeiten. Aus dieser Anforderung, der Kompatibilität mit dem Brownfield, lassen sich die wesentlichen Gestaltungsgrößen unmittelbar ableiten. Der Arbeitsraum muss den anthropometrischen Greifraum abdecken. Die Grundfläche muss auf bestehenden Verkehrswegen und an bestehenden Arbeitsplätzen verkehrsfähig sein. Die Traglast muss sich an den Grenzwerten der manuellen Lastenhandhabung orientieren. Zudem muss das System die am Arbeitsplatz vorhandenen Werkzeuge, Vorrichtungen und Ladungsträger unverändert nutzen können. Anthropomorphie ist damit Mittel zum Zweck und kein Selbstzweck.

Zwischen einer erforderlichen Fähigkeit und ihrer technischen Realisierung besteht keine eindeutige Zuordnung. Jede Fähigkeit lässt sich auf mehreren Wegen umsetzen, die sich in Komplexität, Kosten, Zuverlässigkeit und Integrationsaufwand unterscheiden. Die folgende Übersicht skizziert diesen Gestaltungsraum. Dieser ist in Abbildung 2 beispielhaft visualisiert.

- **Ortswechsel.** Radgebundene Basis, Beine oder stationäre Anordnung.
- **Vertikale Reichweite.** Hubachse, Rumpfkinematik oder Bein- und Ganzkörperbewegung.
- **Beidhändiges Arbeiten.** Zwei Manipulatoren oder ein Manipulator mit zusätzlicher Vorrichtung.
- **Flexible Manipulation.** Werkzeugwechsler, industrielle Greifer oder Mehrfingerhand.
- **Variable Umgebung.** Kamera, 3D-Sensorik, Kraft- und Momentensensorik oder taktile Sensorik.
- **Physische Interaktion.** Drehmomentregelung, Impedanzregelung oder nachgiebige Aktuatoren.



Abbildung 2. Beispielhafter Aufbau eines HPR. Bestehend aus einem fahrerlosen Transportsystem, zwei Roboterarmen zur Führung verschiedener Endeffektoren und integrierten Kameras. Die Darstellung ist KI-generiert und dient der Veranschaulichung.

Die technische Gestalt ergibt sich damit aus der Aufgabe und nicht umgekehrt. Eine humanoide Ausprägung ist immer dann gerechtfertigt, wenn sie die Aufgabe mit geringerem Gesamtaufwand erfüllt als eine alternative Automatisierungslösung.

Für einen großen Anteil heutiger Produktionsaufgaben stellt eine mobile radgebundene Basis mit höhenadaptiver Zweiarmkinematik

eine besonders geeignete technische Ausprägung dar. Für industrielle Brownfield-Anwendungen ist diese Ausprägung aus mehreren Gründen plausibel.

- Industrielle Verkehrswege sind überwiegend eben befestigt und normativ geregelt.
- Eine radgebundene Basis ist technisch deutlich weniger komplex als eine zweibeinige Fortbewegung.
- Eine vertikale Hubachse erweitert den vertikalen Arbeitsraum mit einem einzigen Freiheitsgrad.
- Zwei Manipulatoren ermöglichen beidhändige Produktionsaufgaben ohne zusätzliche Vorrichtungen.
- Bestehende Arbeitsplätze können weitgehend unverändert genutzt werden.

Zweibeinigkeit erschließt demgegenüber Treppen, Leitern und stark strukturierte Böden. Sie erkauft dies jedoch mit einem inhärent instabilen und permanent zu regelnden Gleichgewicht, mit erhöhtem Energiebedarf und mit reduzierter Nutzlast. Hinzu kommt ein sicherheitstechnisch schwer beherrschbares Sturzrisiko in unmittelbarer Nähe von Personen. In der industriellen Fertigung werden Höhenunterschiede überwiegend über Rampen und Aufzüge überwunden. Für einen großen Teil der betrachteten Tätigkeiten genügt daher Mobilität in der Ebene bei hoher technischer Verfügbarkeit. Beine sind dort zu rechtfertigen, wo die gebaute Umgebung sie tatsächlich erzwingt.

Die beschriebene Konfiguration ist eine exemplarische Ausprägung und keine Definition des HPR. Andere Aufgaben können stationäre Zweiarmsysteme, einen Torso auf einer mobilen Plattform, beinbasierte Systeme oder weitere Kombinationen aus Mobilität und Manipulation erfordern. Die Wahl der Architektur ist deshalb im Einzelfall aus der Aufgabe zu begründen.

Für die exemplarische radgebundene Zweiarmplattform ergeben sich drei kinematische Teilsysteme mit jeweils eigenen Gestaltungsfragen.

Mobile Basis: Die Basis entstammt der Fahrzeugtechnik fahrerloser Transportsysteme. Für den Einsatz an bestehenden Arbeitsplätzen ist eine omnidirektionale Fahrkinematik gegenüber differenzialgetriebenen Auslegungen im Vorteil, da An- und Abfahrvorgänge in engen Arbeitsplatzsituationen ohne Rangiermanöver möglich werden. Die konturbasierte Lokalisierung liefert typischerweise Positioniergenauigkeiten in der Größenordnung von ±10 bis ±50 mm sowie ±1° bis ±2°. Werte im Bereich weniger Millimeter werden erst durch eine Feinpositionierung gegen Referenzmarkern, Konturmerkmale oder mechanische Andockelemente erreicht [51]. Die Basis trägt zudem den Energiespeicher und bestimmt damit maßgeblich Einsatzdauer und Ladekonzept.

Rumpf mit Hubachse: Der Mensch erweitert seinen Greifraum durch Beugen, Hocken und Strecken. Diese Funktion übernimmt in der betrachteten Ausprägung eine vertikale Hub- oder Teleskopachse. Sie ist kinematisch effizient, da ein einzelner Freiheitsgrad einen Höhenbereich erschließt, für den eine gelenkige Nachbildung mehrere Achsen benötigt. Strukturmechanisch ist sie zugleich das kritische Element, weil sie als auskragender, schlanker Träger die Nachgiebigkeit und die niedrigsten Eigenfrequenzen des Gesamtsystems dominiert. Eine zusätzliche Rumpfdrehachse erweitert den kombinierten Arbeitsraum beider Arme erheblich und entkoppelt Manipulation und Navigation.

Zwei Manipulatoren: Die Zweiarmigkeit ist kein Gestaltungszitat, sondern funktional begründet [49]. Ein erheblicher Anteil manueller Produktionstätigkeiten erfordert das Halten, Positionieren oder Spannen eines Bauteils bei gleichzeitiger Bearbeitung oder Fügung. Einarmig ist diese Aufgabe nur über zusätzliche Vorrichtungen und damit über eine Anpassung des Arbeitsplatzes lösbar. Sechsachsige Arme decken die Aufgabenstellung im Sinne der Pose vollständig ab. Siebenachsige Ausführungen führen eine Redundanz ein, die zur Kollisionsvermeidung, zum Ausweichen aus Gelenkgrenzen und zur gezielten Beeinflussung der Nachgiebigkeit am Werkzeugarbeitspunkt genutzt werden kann. Schulterabstand und Schulteranstellung bestimmen den Überlappungsbereich beider Arbeitsräume und damit die tatsächlich beidhändig nutzbare Zone. Je nach Aufgabe können auch weitere Manipulatoren sinnvoll sein; die Zweiarmigkeit ist daher als häufig geeignete, nicht als zwingende Ausprägung zu verstehen.

4.2 Manipulation und modulare Gelenkaktuatoren

Die Leistungsfähigkeit der Manipulation wird wesentlich durch die Gelenkaktuatoren bestimmt. Sie stellen die erforderlichen Drehmomente und Drehzahlen auf engem Bauraum bereit und ermöglichen zugleich eine kontrollierbare Interaktion mit der Umgebung. Motor, Getriebe, Lagerung, Sensorik, Leistungselektronik und Regelung bilden dabei eine funktionale Einheit. Eine isolierte Auslegung einzelner Komponenten nach Nennwerten führt nicht zu einem industriell tragfähigen Gelenk. Zusätzlich wirkt die Eigenmasse jeder Achse in der seriellen Kinematik doppelt, da sie von allen vorgelagerten Achsen mitbewegt werden muss.

Die Auslegung ist deshalb weniger eine Auswahl zwischen einzelnen Motor- oder Getriebebauarten als eine bewusste Entscheidung über technische Zielkonflikte. Für den HPR sind insbesondere die folgenden Zielkonflikte maßgeblich.

- Drehmomentdichte gegenüber Eigenmasse des Aktuators.
- Präzision und Steifigkeit gegenüber Rücktreibbarkeit und Nachgiebigkeit.
- Spitzenleistung gegenüber thermisch dauerhaft verfügbarer Leistung.
- Dynamik gegenüber Energieeffizienz.
- Leistungsfähigkeit im Betriebspunkt gegenüber Lebensdauer und Zuverlässigkeit.
- Technische Leistungsfähigkeit gegenüber Kosten und industrieller Skalierbarkeit.

Das Übersetzungsverhältnis wirkt auf mehrere dieser Zielkonflikte gleichzeitig. Hohe Übersetzungen ermöglichen kompakte und drehmomentstarke Aktuatoren. Sie erschweren jedoch die Rücktreibbarkeit und die schnelle Kraftregelung [26], [27], da die am Gelenk wirksame Rotorträgheit quadratisch mit dem Übersetzungsverhältnis steigt [26], [28]. Konzepte mit geringer Übersetzung und hochmomentigen Motoren verschieben den Zielkonflikt in die Gegenrichtung. Mechanische Transparenz und Dynamik steigen, während Motormasse, Strombedarf und thermische Belastung an Bedeutung gewinnen.

Für die Positioniergenauigkeit ist die motorseitige Messung allein nicht ausreichend, da Nachgiebigkeiten, Spiel und Reibung im Gelenk zu lastabhängigen Abweichungen am Endeffektor führen. Entscheidend ist eine über Last, Temperatur und Gebrauchsdauer reproduzierbare Übertragungscharakteristik des Gelenks.

Das dauerhaft verfügbare Drehmoment wird in der Regel thermisch und nicht magnetisch begrenzt [29], [30], [31]. Die Verluste in Wicklung und Getriebe müssen aus einem geschlossenen Gelenk mit kleiner Oberfläche abgeführt werden. Spitzenmoment und dauerhaft verfügbares Gelenkmoment sind deshalb getrennt anzugeben und über das Lastkollektiv des Arbeitszyklus nachzuweisen. Für einen Produktionsroboter mit mehrstündigen, wiederkehrenden Arbeitszyklen ist die dauerhaft verfügbare Leistungsfähigkeit mindestens ebenso relevant wie die in dynamischen Bewegungen erreichbare Spitzenleistung.

Mit zunehmender Gebrauchsdauer ist nicht erst der vollständige Ausfall eines Gelenks relevant. Verschleiß sowie Veränderungen von Schmierung, Kontaktzuständen und Vorspannungen [32], [33] verändern Lost Motion, Steifigkeit, Reibung und Wirkungsgrad. Diese Größen sind zugleich Parameter des dynamischen Modells und der Gelenkregelung. Die Zuverlässigkeitsanforderung ist deshalb funktional zu formulieren. Das Gelenk muss seine funktionsrelevanten mechanischen Eigenschaften über einen definierten Gebrauchsdauerbereich innerhalb zulässiger Grenzen halten. Die dafür erforderliche Zustandsüberwachung kann auf die ohnehin vorhandene Motor-, Positions- und Momentensensorik zurückgreifen.

Aus den unterschiedlichen Belastungsprofilen der Achsen folgt, dass es nicht den einen optimalen Gelenkaktuator für den gesamten Roboter gibt. Proximale Achsen wie Schulterachsen tragen die Masse der nachfolgenden Struktur und benötigen hohe Dauer- und Spitzendrehmomente. Dort stehen Drehmomentdichte, Tragfähigkeit, Steifigkeit und thermisches Verhalten im Vordergrund. In distalen Achsen wie Handgelenken gewinnt die Eigenmasse des Aktuators überproportional an Bedeutung. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Rücktreibbarkeit und feinfühlige Kraftregelung in Richtung des Endeffektors. Das technische Zielbild ist deshalb eine Familie modularer, achsspezifisch ausgelegter Gelenkaktuatoren, bei denen Motor, Getriebe, Lagerung, Sensorik, Leistungselektronik und Regelung gemeinsam ausgelegt werden.

Endeffektoren. Zwischen anthropomorpher Mehrfingerhand und industriellem Greifer mit Wechselsystem besteht ein Zielkonflikt aus Universalität einerseits sowie Genauigkeit, Steifigkeit, Kosten und Verfügbarkeit andererseits. Die fünffingrige Hand ist dort wirtschaftlich, wo tatsächlich menschliche Handwerkzeuge bedient und unstrukturierte Griffe ausgeführt werden müssen. Für die Mehrzahl der Handhabungs- und Montageaufgaben ist ein Wechselsystem mit aufgabenspezifischen Effektoren aus heutiger Sicht das robustere und zuverlässigere Konzept. Mit fortschreitender Entwicklung können Mehrfingerhände jedoch an Bedeutung gewinnen, da sie Taktzeitverluste durch Werkzeugwechsel vermeiden und eine Umorientierung von Objekten in der Hand ermöglichen. Auch auf dieser Ebene bestimmt die Aufgabe die technische Ausprägung.

Industrielle Skalierbarkeit. Mit steigenden Stückzahlen wird die Fertigung der Gelenkaktuatoren selbst zu einer Systemanforderung. Präzisionsgetriebe verbinden hohe Anforderungen an Tragfähigkeit, Lost Motion und Wirkungsgrad mit engen Bauraum- und Massengrenzen. Entscheidend ist nicht die maximal erreichbare Präzision eines Einzelbauteils, sondern deren prozesssichere Reproduzierbarkeit über die Serienfertigung. Eine messtechnisch rückgekoppelte und digital durchgängige Fertigungskette verknüpft geometrische Bauteilabweichungen und Prozesszustände mit den funktionalen Getriebeeigenschaften. Toleranzen können dadurch funktionsorientiert bewertet und Abweichungen frühzeitig kompensiert werden. Hierin liegt eine Stärke der europäischen Produktionstechnik, die für die Skalierung humanoider Produktionsroboter gezielt genutzt werden sollte.

4.3 Sensorik, Rechen- und Steuerungsarchitektur

Die in Kapitel 2 beschriebenen Fähigkeiten der Perzeption, Kognition und Adaptivität setzen eine geeignete Sensorik- und Steuerungsarchitektur voraus. Aus produktionstechnischer Sicht ist nicht die maximale Ausstattung maßgeblich, sondern die aufgabengerechte Auswahl. Die erforderliche Sensorik ergibt sich aus der Variabilität von Werkstücken, Umgebung und Prozess.

Für die Handhabung nur teilweise bestimmter Werkstücklagen sind bildgebende und tiefenauflösende Verfahren erforderlich. Fügeprozesse mit engen Toleranzen erfordern zusätzlich Kraft- und Momentensensorik am Gelenk oder am Endeffektor. Taktile Sensorik ist dort sinnvoll, wo Kontaktzustände nicht mit ausreichender Sicherheit aus Positions- und Momentengrößen abgeleitet werden können. Jede zusätzliche Sensormodalität erhöht jedoch Kosten, Kalibrieraufwand und Fehlerquellen im Betrieb.

Die Steuerungsarchitektur ist zweckmäßig in Ebenen mit unterschiedlichen Zeitanforderungen zu gliedern. Auf der untersten Ebene arbeiten die echtzeitfähige Gelenk- und Kraftregelung sowie die sicherheitsrelevanten Antriebsfunktionen. Darüber koordiniert in der Regel ein Whole-Body-Controller die Bewegungen aller Gelenke. Darauf bauen Bahnplanung, Greifplanung und Zustandsüberwa-

chung auf. Die oberste Ebene übernimmt Aufgabenplanung, Ablaufsteuerung und die Anbindung an die Produktionsplanung. Für den industriellen Einsatz ist entscheidend, dass die sicherheits- und regelungsrelevanten Anteile deterministisch bleiben, auch wenn übergeordnete Ebenen lernende Verfahren nutzen.

Onboard-Rechenleistung, Latenz und Energiebedarf stehen dabei in einem Zielkonflikt. Dabei ist zwischen dem Training lernender Modelle, das in der Regel vorab und extern erfolgt, und ihrer Ausführung im Betrieb zu unterscheiden. Insbesondere die Ausführung lernender Verfahren erhöht die Anforderungen an Rechenleistung und damit an Energiebedarf und Kühlung im mobilen Betrieb. Eine Verlagerung von Rechenlast in eine betriebsinterne Infrastruktur ist möglich, erfordert jedoch verlässliche Kommunikation und ein definiertes Verhalten bei Verbindungsverlust. Funktionen mit Sicherheitsrelevanz sind lokal auszuführen.

Lernende Anteile sind so einzubinden, dass ihr Verhalten überprüfbar bleibt. Erforderlich sind definierte Eingangs- und Gültigkeitsbereiche, eine Bewertung der eigenen Unsicherheit sowie sichere Rückfallebenen bei Überschreitung dieser Bereiche. Diese Anforderung ist eng mit der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Standardisierung verbunden.

4.4 Modularität und Schnittstellen

Die aufgabenorientierte Ableitung technischer Ausprägungen führt zu einer Vielzahl möglicher Konfigurationen. Wirtschaftlich tragfähig wird dieser Ansatz nur, wenn die Konfigurationen aus wiederverwendbaren Modulen aufgebaut werden. Modularität ist damit keine konstruktive Nebenbedingung, sondern eine zentrale Anforderung an das technische Zielbild. Sie betrifft mehrere Ebenen.

- Mechanische Module wie mobile Basis, Hubachse, Rumpf, Arme und Endeffektoren.
- Antriebsmodule in Form der achsspezifisch ausgelegten Gelenkaktuatoren.
- Sensormodule mit definierten mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Schnittstellen.
- Softwaremodule, die robotische Fähigkeiten als beschreibbare und prüfbare Funktionen bereitstellen.

Voraussetzung sind einheitlich beschriebene Schnittstellen. Mechanisch und elektrisch betrifft dies insbesondere Werkzeug- und Effektorwechselsysteme sowie den Austausch von Antriebs- und Energiemodulen im Servicefall. Informationstechnisch sind Fähigkeiten, Zustände, erreichbare Genauigkeiten und Einsatzgrenzen maschinenlesbar zu beschreiben. Erst dadurch lassen sich Module unterschiedlicher Hersteller kombinieren. Bei lernenden Verfahren kommt hinzu, dass ein Modell Aufgaben auch über unterschiedliche Endeffektoren hinweg übertragen kann, wie erste Arbeiten zu VLA-Modellen zeigen [53].

Modularität wirkt zugleich auf Kosten und Verfügbarkeit. Wiederverwendbare Module senken Entwicklungs- und Stückkosten, verkürzen die Inbetriebnahme und ermöglichen einen schnellen Austausch defekter Komponenten. Sie sind damit Voraussetzung für die in Abschnitt 4.5 behandelte industrielle Verfügbarkeit und für den in Kapitel 6 empfohlenen Baukastenansatz.

4.5 Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Produktivität

Der Einsatz in menschlichen Arbeitsumgebungen setzt ein durchgängiges Sicherheitskonzept voraus. Erforderlich sind sicher begrenzte Geschwindigkeiten, ein sicher abgeschaltetes Moment, ein definiertes Verhalten der Haltebremsen bei Energieausfall sowie sichere Zustände beim Ausfall einzelner Komponenten [34], [35], [36]. Bei mobilen Systemen ist zusätzlich die Überlagerung von Fahr- und Manipulationsbewegungen zu betrachten. Ein sicherer Zustand muss in jeder Konfiguration ohne unkontrollierte Bewegung erreichbar sein. Diese Anforderungen sind bereits bei der Wahl der Architektur zu berücksichtigen und nicht nachträglich zu ergänzen.

Die Verfügbarkeit des Gesamtsystems ist eine zentrale Zielgröße für den industriellen Einsatz. Humanoide Produktionsroboter bestehen aus einer großen Zahl mechanischer, elektrischer und informationstechnischer Komponenten, die für die Ausführung einer Aufgabe zusammenwirken. Der Ausfall eines einzelnen kritischen Subsystems kann daher zum Stillstand des gesamten Systems führen. Betroffen sind beispielsweise Gelenkantriebe, Sensoren, die Recheneinheit oder die Energieversorgung. Neben einer hohen Zuverlässigkeit der Komponenten gewinnen deshalb eine schnelle Fehlerdiagnose, kurze Wiederherstellungszeiten und modular austauschbare Komponenten an Bedeutung. Bei der Bewertung industrieller Robotersysteme ist die mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen relevant. Ebenso maßgeblich ist die Zeit, bis das System nach einem Ausfall wieder einsatzbereit ist.

Eine besondere Herausforderung mobiler Systeme stellt die Energieversorgung dar. Da die Systeme zwischen unterschiedlichen Arbeitsstationen eingesetzt werden sollen, ist eine dauerhaft kabelgebundene Versorgung im mobilen Betrieb nicht praktikabel. Aktuatoren für Fortbewegung und Manipulation müssen gemeinsam mit Sensorik, Kommunikation und Onboard-Rechenhardware aus einem mitgeführten Energiespeicher versorgt werden. Dieser muss sowohl ausreichend Energie für die gewünschte Betriebsdauer als auch kurzfristig hohe Leistungsspitzen bereitstellen. Größe und Masse des Energiespeichers sind jedoch durch Bauraum und zulässige Gesamtmasse begrenzt. Die endliche Energiedichte von Batteriesystemen führt damit zu einem Zielkonflikt zwischen Betriebsdauer, Mobilität, Bauraum und Masse.

Das geeignete Versorgungskonzept hängt wesentlich vom Einsatzprofil ab. Sowohl der Energiebedarf als auch die geeignete Form der Energieversorgung werden durch die Arbeitsaufgabe und das Bewegungsprofil bestimmt. Arbeitet der Roboter über längere Zeit stationär an einem Arbeitsplatz, kann dort eine externe Versorgung oder ein gleichzeitiges Laden sinnvoll sein. Ist dies aufgrund häufiger Ortswechsel nicht möglich und erlaubt der Produktionsprozess kurze Unterbrechungen, können schnell oder automatisiert wechselbare

Batteriesysteme eingesetzt werden. Dadurch bleiben die erforderlichen Betriebsunterbrechungen kurz.

Für eine hohe betriebliche Verfügbarkeit müssen Ladezustand und Leistungsfähigkeit der Batterie überwacht und bei der Einsatzplanung berücksichtigt werden. Geeignete mechanische und elektrische Schnittstellen sollten Lade- und Batteriewechselvorgänge einfach und schnell ermöglichen. Insgesamt erfordert eine hohe betriebliche Verfügbarkeit sowohl zuverlässige und schnell wiederherstellbare Komponenten als auch ein Energieversorgungskonzept, das notwendige Betriebsunterbrechungen minimiert.

Über die Tragfähigkeit einer Architektur entscheidet nicht die punktuelle Prozessleistung, sondern die über den Lebenszyklus bilanzierte Produktivität. Sie schließt neben der Prozessausführung die Aufwände für Anlernen, Umrüsten und Wiederinbetriebnahme sowie für Betrieb, Instandhaltung und Verwertung ein. Ein HPR muss deshalb nicht in jeder Einzeltätigkeit die Taktzeit einer spezialisierten Lösung erreichen; sein Vorteil entsteht bei hoher Variantenzahl, kleinen Losgrößen und häufiger Rekonfiguration [50]. Belastbare Kennzahlen für diese Bilanz sollten in den Pilotanwendungen nach Abschnitt 6.3 erhoben werden.
Die in diesem Kapitel beschriebenen Anforderungen bilden zusammen die Bewertungsgrundlage für eine gewählte Architektur. Eine technische Ausprägung ist erst dann industriell tragfähig, wenn sie die jeweilige Produktionsaufgabe sicher, zuverlässig, wirtschaftlich und mit geringem Integrationsaufwand erfüllt. Erst diese Validierung entscheidet über die Skalierbarkeit einer Lösung. Die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen fasst Kapitel 6 zusammen.

5 Europäische Perspektive und Ökosystem

Das technische Zielbild aus Kapitel 4 beschreibt Anforderungen, die unabhängig vom Standort gelten. Für die industrielle Umsetzung ist zusätzlich zu klären, welche der erforderlichen Fähigkeiten in Deutschland und Europa verfügbar sind. Dieses Kapitel ordnet die Wettbewerbsposition ein und grenzt die Kompetenzprofile der führenden Regionen voneinander ab. Die Abgrenzung erfolgt entlang der Wertschöpfungskette und nicht als Gesamtbewertung. Abschließend wird das Ökosystem einschließlich vorhandener Transferstrukturen beschrieben.

5.1 Stückzahlen und Einsatzreife

Das globale Marktgeschehen wird derzeit von chinesischen Anbietern bestimmt. Im Jahr 2025 wurden weltweit mehr als 13.000 humanoide Roboter ausgeliefert. Die Hersteller AGIBOT und Unitree lieferten dabei jeweils über 5.000 Einheiten. Chinesische Anbieter erreichten damit einen Marktanteil von etwa 85 % [37]. Für 2026 wird eine Verdopplung der chinesischen Absatzzahlen auf rund 28.000 Einheiten erwartet [37]. Deutschland belegt im Wettbewerbsumfeld spezialisierter Start-ups derzeit den fünften Platz [6]. Diese Kennzahl bezieht sich jedoch auf die Anzahl der Unternehmen und nicht auf die industrielle Umsetzungsfähigkeit.

Die Stückzahl ist kein Maß für die Einsatzreife in der Produktion. Die dominierenden Anwendungen liegen bislang in Demonstration und Unterhaltung. Weitere Einsätze finden sich in der Paketsortierung, in Sicherheitsdiensten und bei Führungen [37]. Für die meisten verfügbaren Modelle wird berichtet, dass sie in unvorhersehbaren Umgebungen nicht zuverlässig arbeiten [37]. Damit bestätigt sich die in Abschnitt 2.1 beschriebene Diskrepanz zwischen Demonstration und industrieller Robustheit.

Für die Einordnung der europäischen Position folgt daraus eine wesentliche Aussage. Der Wettbewerb ist auf jener Dimension noch nicht entschieden, die für den industriellen Einsatz maßgeblich ist. Hierzu gehören Zuverlässigkeit, funktionale Sicherheit, Verfügbarkeit und reproduzierbare Präzision. Diese Eigenschaften bilden nach Kapitel 4 die Voraussetzung für einen HPR.

5.2 Kompetenzprofile der führenden Regionen

Die Kompetenzen der führenden Regionen unterscheiden sich deutlich voneinander. Eine Abgrenzung entlang der Wertschöpfungskette ist deshalb aussagekräftiger als eine pauschale Rangfolge.

Die Stärken der USA liegen in KI-Basismodellen, in der Verfügbarkeit von Wagniskapital und in Softwareplattformen. Einzelne Anbieter verfolgen eine vertikale Integration von Hardware und Modellentwicklung. Die realisierten Stückzahlen bleiben dabei bislang gering [37].

China verfügt über eine skalierbare Lieferkette für Komponenten und über niedrige Komponentenkosten. Hinzu kommen eine hohe Implementierungsgeschwindigkeit und eine staatlich getragene Nachfrage [3]. Daraus ergibt sich die derzeitige Führung bei den Stückzahlen.

Europa setzt nach [2] vor allem auf kollaborative Robotik, die Sicherheit und Effizienz verbessern soll, statt Arbeitskräfte zu ersetzen. Industrielle Stärken liegen insbesondere in der Antriebs- und Getriebetechnik, die Sensorik und die Leistungselektronik. Hinzu kommen die funktionale Sicherheit, die Systemintegration und das Anwendungswissen in der Produktion. Eine besondere Rolle spielt die Serienfertigung präziser Gelenkaktuatoren. Die hierfür erforderliche messtechnisch rückgekoppelte Fertigung ist nach Abschnitt 4.2 eine europäische Stärke.

Europa konkurriert damit weder über Stückzahlen noch über Basismodelle. Der eigene Beitrag liegt in der industriellen Qualifizierung der Systeme.

5.3 Kompetenzen in Deutschland

Die deutschen Kompetenzen sind auf mehreren Ebenen der Wertschöpfungskette vorhanden. Auf der Komponentenebene zeigt sich dies an aktuellen Entwicklungspartnerschaften. Schaeffler entwickelt und liefert Schlüsselkomponenten für humanoide Roboter, darunter Planetenradaktoren für Gelenke mit Leistungsklassen bis 250 Nm [38]. Eine weitere Kooperation besteht zwischen Neura

Robotics und Bosch bei Hard- und Software [39]. Die Firma Gessmann bietet ein mobiles Cobotsystem mit zwei integrierten Roboterarmen für Pick and Place sowie Montageanwendungen als fertiges Gesamtprodukt an [43]. Weitere Anbieter wie Synapticon liefern Antriebs- und Steuerungselektronik für Robotergelenke. Darüber hinaus beliefern deutsche Maschinen- und Anlagenbauer bereits heute Hersteller humanoider Roboter mit Produktionstechnik und sind damit auch an der Herstellung der Systeme beteiligt.

Von besonderer Bedeutung ist eine Doppelrolle, die in dieser Form vor allem in Deutschland auftritt. Unternehmen treten gleichzeitig als Komponentenlieferant und als Anwender auf. Schaeffler beabsichtigt, bis 2035 eine mittlere vierstellige Zahl humanoider Roboter in die eigene Produktion zu integrieren [38]. Dabei entstehen reale Anwendungsdaten, die für das Training der Systeme genutzt werden [38].

Diese Kopplung ist strategisch relevant. Anwendungsdaten aus realer Serienproduktion lassen sich nicht durch Kapital ersetzen. Sie entstehen nur dort, wo Produktionsprozesse in industrieller Qualität betrieben werden. Der in Abschnitt 5.4 beschriebene Datennachteil wird dadurch teilweise ausgeglichen. Auf der Anwenderebene bestehen zudem die in Abschnitt 2.1 genannten Pilotanwendungen bei BMW und Mercedes-Benz.

Auch forschungsseitig wird das Thema in Deutschland bearbeitet. Universitäre und außeruniversitäre Einrichtungen arbeiten an Manipulation, Wahrnehmung, Ganzkörperregelung und Sicherheitsnachweis. Zwischen dieser Forschung und den genannten industriellen Kompetenzen vermitteln Förderformate, die beide Seiten verbinden. Beispiele sind das in Abschnitt 5.5 beschriebene ProKI-Netzwerk [41] sowie die derzeit in Begutachtung befindlichen RoboHubs. Ein durchgängiger Transfer von der Forschung in die Serienanwendung ist damit jedoch noch nicht gesichert.

5.4 Abhängigkeiten und strukturelle Schwächen

Der beschriebenen Stärke stehen Abhängigkeiten gegenüber. Sie betreffen insbesondere KI-Basismodelle und Rechenhardware. Weitere Abhängigkeiten bestehen bei Batteriezellen und bei Magnetwerkstoffen für Aktuatoren. Begrenzt sind zudem der Zugang zu großen Trainingsdatenbeständen und die Verfügbarkeit von Wagniskapital für die Skalierung. Hinzu kommen geopolitische Unsicherheiten. Handelsbeschränkungen zwischen den USA, China und Europa, etwa in den USA diskutierte Beschränkungen für chinesische Robotiksysteme, können Lieferketten und Marktzugang kurzfristig verändern.

Daraus ergibt sich ein struktureller Zielkonflikt. Eine Beschränkung auf die Zulieferrolle sichert kurzfristig Wertschöpfung. Sie führt jedoch zu Abhängigkeiten im Betrieb, etwa bei Software, Aktualisierungen und Sicherheitsnachweisen. Die Gestaltungsmöglichkeiten der Anwenderunternehmen sinken dadurch.

Der regulatorische Rahmen wirkt in zwei Richtungen. Die Verordnung (EU) 2023/1230 gilt ab dem 20. Januar 2027 und ersetzt die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [40]. Sie adressiert erstmals Systeme mit sich selbst entwickelndem Verhalten sowie KI-basierte Sicherheitsbauteile. Der Nachweisaufwand steigt dadurch, insbesondere angesichts der in Abschnitt 2.2 genannten Zertifizierungszeiten. Zugleich entsteht ein Marktzugangsvorteil für Anbieter mit belastbarer Sicherheitstechnik. Diese Anforderung deckt sich mit der europäischen Kompetenz in der funktionalen Sicherheit.

5.5 Ökosystem und Transferstrukturen

Die industrielle Nutzung von HPR erfordert das Zusammenwirken mehrerer Akteursgruppen. Hierzu gehören Komponentenhersteller, Systemanbieter, Integratoren, Anwenderunternehmen, Forschungseinrichtungen und Normungsgremien. Diese Gruppen sind in Deutschland vorhanden. Die Verbindungen zwischen ihnen sind jedoch unvollständig. Komponentenherstellern fehlen häufig systemische Anforderungsprofile. Anwenderunternehmen fehlen belastbare Bewertungsgrundlagen. Kleinen und mittleren Unternehmen fehlt häufig noch der Zugang zu Testumgebungen, auch wenn an Standorten wie München und Aachen sowie an Fraunhofer-Instituten zuletzt zahlreiche Angebote entstanden sind.

Für diese Kopplungsaufgabe bestehen bereits Strukturen. Das ProKI-Netzwerk verbindet acht Universitätsinstitute und unterstützt kleine und mittlere Unternehmen bei der Einführung von KI in der Produktion [41]. Beteiligt sind die FAU Erlangen-Nürnberg, das KIT, die TU Ilmenau, die Leibniz Universität Hannover, die TU Dresden, die TU Darmstadt, die TU Berlin und die RWTH Aachen. Das Netzwerk wurde zunächst durch das BMBF gefördert und wird seit Januar 2025 unter dem Dach der WGP fortgeführt [41]. Angeboten werden Beratung, Workshops, Demonstratoren und Seminare.

Der thematische Zuschnitt liegt bislang auf datengestützten Lösungen in Produktionsprozessen. Robotische Hardware und humanoide Systeme sind nicht Gegenstand. Das Netzwerk ist deshalb als Struktur und als Vorgehensmodell übertragbar. Eine Erweiterung um Manipulation, Wahrnehmung, Sicherheitsnachweis und betriebliche Datenerfassung erscheint möglich. Als nationale Struktur kann ProKI zudem als Kern eines europäisch koordinierten Netzwerks dienen.

Zusammenfassend liegt die deutsche und europäische Stärke dort, wo nach Kapitel 4 die wesentlichen industriellen Hürden bestehen. Sie wirkt jedoch nur bei koordinierter Umsetzung. Die hierfür erforderlichen Maßnahmen beschreibt Kapitel 6.

6 Fazit und Handlungsempfehlungen

Roboter mit humanoiden Eigenschaften werden die Produktion nicht durch die möglichst vollständige Nachbildung des Menschen verändern. Entscheidend ist vielmehr, produktionsrelevante Fähigkeiten aus unterschiedlichen Robotikansätzen so zu verbinden, dass variable Aufgaben in realen Fabrikumgebungen sicher, wirtschaftlich und mit vertretbarem Integrationsaufwand ausgeführt werden können.

Die in Kapitel 4 dargestellte Ableitungskette von der Produktionsaufgabe über die erforderlichen Fähigkeiten zur technischen Realisierung bildet dafür die methodische Grundlage. Deutschland und Europa verfügen hierfür über eine starke Ausgangslage, etwa fundiertes Produktionswissen, leistungsfähige Komponenten, etablierte Integratoren und eine hohe Anwendungskompetenz. Diese Stärke muss nun in eine gemeinsame Entwicklungs- und Umsetzungsagenda überführt werden.

Der vorliegende Standpunkt empfiehlt deshalb einen aufgabenorientierten und modularen Weg. Im Mittelpunkt stehen weder ein einheitliches Roboterdesign noch eine bestimmte Körpergeometrie oder Fortbewegungsform, sondern die systematische Zuordnung von Produktionsaufgaben zu benötigten Fähigkeiten und technischen Komponenten. Ein solcher Baukastenansatz ermöglicht domänenspezifische Lösungen. Er verbindet klassische Industrierobotik, kollaborative und mobile Robotik, flexible Handhabungstechnik sowie leistungsfähige Sensorik zu modularen Systemen, die sich gezielt an unterschiedliche Produktionsaufgaben und Umgebungsbedingungen anpassen lassen. Zugleich stärkt er die Akzeptanz, da hierdurch robotische Systeme als Unterstützung der Mitarbeitenden und nicht als deren pauschaler Ersatz entwickelt und eingeführt werden.

Ein zweibeiniger Humanoid kann für bestimmte Aufgaben sinnvoll sein, etwa wenn Treppen, Leitern oder stark strukturierte Böden zu überwinden sind. Für andere Anwendungen können abweichende Ausprägungen funktional besser geeignet sein. Dazu zählen ein mobiler Zweiarmroboter, ein stationäres Zweiarmsystem, ein Torso auf einer mobilen Plattform, ein System mit vertikaler Hubachse oder weitere Kombinationen aus Mobilität und Manipulation. Entscheidend ist ausschließlich, ob die gewählte Architektur die jeweilige Produktionsaufgabe sicher, zuverlässig, wirtschaftlich und mit geringem Integrationsaufwand erfüllt. Die humanoide Ausprägung ist damit Mittel zum Zweck und kein Selbstzweck.

Die WGP formuliert fünf Handlungsempfehlungen für die Entwicklung von Produktionsrobotern mit humanoiden Eigenschaften. Sie folgen unmittelbar aus den in den Kapiteln 1 bis 4 dargestellten Aufgabenprofilen, Fähigkeitsanforderungen und technischen Zielkonflikten.

1. Produktionsaufgaben konsequent in den Mittelpunkt stellen. Robotische Systeme sollen nach ihrem konkreten Nutzen für Produktionsaufgaben entwickelt und bewertet werden, nicht nach dem Grad ihrer äußerlichen Ähnlichkeit mit dem Menschen. Maßgeblich ist die Ableitung von der Produktionsaufgabe über die erforderlichen Fähigkeiten zur technischen Realisierung.

2. Modulare Baukastensysteme entwickeln. Produktionsroboter sollen aus flexibel kombinierbaren Komponenten bestehen, die sich an unterschiedliche Aufgaben, Prozesse und Umgebungsbedingungen anpassen lassen. Die Module reichen von der mobilen Basis über achsspezifisch ausgelegte Gelenkaktuatoren bis zu Endeffektoren und Softwarefunktionen. Im Unterschied zu heutigen, überwiegend als geschlossene Gesamtsysteme angebotenen Robotersystemen erfordert dies eine zunehmende Standardisierung von Schnittstellen und Fähigkeitsbeschreibungen (vgl. Abschnitt 4.4). Hersteller, Integratoren und Forschung sollten solche Baukästen gemeinsam entwickeln; Politik und Forschungsförderung können dies durch gezielte Förderung und die Unterstützung der Standardisierung beschleunigen.

3. Robotische Fähigkeiten offen und bedarfsgerecht realisieren. Mobilität, Manipulation, Wahrnehmung, Haptik, Planung und Interaktion sollen möglichst modular entwickelt und für die jeweilige Anwendung geeignet kombiniert werden, wobei ihre wechselseitigen Abhängigkeiten zu berücksichtigen sind. Körpergeometrie und Fortbewegungsform sind dabei Ergebnis der Auslegung und keine Vorgabe.

4. Lernende Systeme durch Normen und Standards absichern. Fähigkeiten, Grenzen, Unsicherheiten, Sicherheitsanforderungen und Verantwortlichkeiten sollen einheitlich beschrieben, überprüfbar und herstellerübergreifend vergleichbar sein. Dies gilt insbesondere für Gültigkeitsbereiche, Unsicherheitsangaben und sichere Rückfallebenen. Da sich diese nach heutigem Stand der Technik noch nicht im Voraus belastbar bestimmen lassen, sind vor einer Standardisierung weitere Entwicklungsschritte erforderlich.

5. Industrielle Anwendungen schrittweise und anwendungsnah erproben. Pilotprojekte sollen klar abgegrenzte Aufgaben adressieren und belastbare Erkenntnisse für technische Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Arbeitsgestaltung liefern. Zu bewerten sind dabei auch Sicherheit, Verfügbarkeit und Integrationsaufwand.

6.1 Forschungsagenda

Aus wissenschaftlicher Sicht besteht der zentrale Forschungsbedarf darin, Produktionsaufgaben, robotische Fähigkeiten und technische Realisierungen systematisch miteinander zu verknüpfen. Dazu sind zunächst belastbare Beschreibungen von Aufgabenprofilen erforderlich. Sie sollten neben dem Arbeitsinhalt auch die Wertigkeit der Tätigkeit, die erforderliche Flexibilität, die Umgebungsbedingungen sowie die Folgen einer Teil- oder Vollautomatisierung erfassen. Auf dieser Grundlage kann bewertet werden, welche Aufgaben sich für eine robotische Unterstützung eignen, welche Fähigkeiten dafür benötigt werden und an welchen Stellen menschliche Erfahrung, Urteilskraft und Verantwortung weiterhin konstitutiv sind.

Die Forschungsagenda sollte insbesondere folgende Themen bündeln.

- Aufgaben und Fähigkeiten systematisch beschreiben und einander zuordnen.
- Lernverfahren entwickeln, die Produktionswissen, Simulation, Demonstrationen und Prozessdaten verbinden.
- Wahrnehmung und Haptik für variable Werkstücke und Umgebungen robust machen.
- Endeffektoren, Werkzeuge und Hardware modular und bedarfsgerecht auslegen.
- Lernende Systeme verifizieren, überwachen und mit sicheren Rückfallebenen ausstatten.

- Interaktion, Qualifizierung und Arbeitsgestaltung auf Entlastung und Kompetenzentwicklung ausrichten.
- Wirtschaftlichkeit anhand von Leistung, Kosten, Verfügbarkeit, Energie und Beschäftigtennutzen bewerten.
- Fertigungstechnologien, Produktionsanlagen und Messtechnik für die skalierbare Herstellung robotischer Komponenten weiterentwickeln.

Die Forschungsförderung sollte diese Themen nicht isoliert in Einzeltechnologien bearbeiten. Notwendig sind interdisziplinäre Vorhaben, in denen Produktionstechnik, Robotik, künstliche Intelligenz, Arbeitswissenschaft, Recht und Standardisierung gemeinsam an realen Aufgabenstellungen arbeiten. Innerhalb der nächsten drei Jahre sollten priorisierte Forschungs- und Transferstrukturen aufgebaut, Referenzanwendungen definiert und erste belastbare Demonstratoren unter industriellen Bedingungen validiert werden.

Drei Jahre sind dabei kein Zeithorizont für die vollständige technologische Entwicklung des HPR. Sie markieren die Phase, in der die Grundlagen für einen längerfristigen Entwicklungspfad gelegt werden. Daran anschließend sind die validierten Fähigkeiten schrittweise auf breitere Aufgabenklassen zu übertragen, in modulare Produktfamilien zu überführen und über Normen und Standards abzusichern. Was in der ersten Phase nicht vorbereitet wird, wird im internationalen Wettbewerb nur schwer aufzuholen sein.

6.2 Standards und Rahmenbedingungen

Die industrielle Nutzung robotischer Systeme mit humanoiden Eigenschaften wird wesentlich davon abhängen, ob Systeme verschiedener Hersteller in bestehende Produktionsumgebungen integriert werden können. Dafür braucht es weniger eine neue Insellösung als eine anschlussfähige, europäisch koordinierte Architektur. Standards sollten deshalb aufgaben-, fähigkeits- und schnittstellenorientiert entwickelt werden. Sie müssen beschreiben, welche Informationen ein System benötigt, welche Fähigkeiten es anbietet, wie Zustände und Unsicherheiten kommuniziert werden und wie Verantwortlichkeiten zwischen Mensch, Roboter, Anlage und übergeordnetem Leitsystem verteilt sind.

Aus Sicht der WGP sind insbesondere fünf Standardisierungsfelder prioritär.

- Begriffe, Fähigkeiten, Autonomiegrade und Einsatzgrenzen einheitlich definieren.
- Aufgaben, Fähigkeiten, Werkzeuge und Randbedingungen maschineninterpretierbar verknüpfen.
- Werkstücke, Prozesse, Zustände und Lernergebnisse über standardisierte Modelle beschreiben.
- Offene Schnittstellen für Echtzeitkommunikation und ausfallsichere Integration schaffen.
- Sicherheit, Nachweisführung, Cybersecurity und Verantwortlichkeiten verbindlich regeln.

Dabei ist auf eine innovationsfreundliche Regulierung zu achten. Anforderungen an Sicherheit, Datenschutz und Haftung müssen verlässlich und frühzeitig klärbar sein, dürfen aber nicht durch technologiespezifische Vorgaben die Entwicklung besserer Lösungen verhindern. Empfehlenswert ist ein risikobasierter, an der konkreten Aufgabe und Betriebsumgebung ausgerichteter Ansatz. Referenzarchitekturen, offene Testfelder und standardisierte Prüfverfahren können insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen helfen, Anforderungen zu bewerten und Investitionsentscheidungen abzusichern.

Die WGP sollte ihre wissenschaftliche Expertise nutzen, um an der internationalen Standardisierung mitzuwirken und die produktionstechnische Perspektive einzubringen. Ziel sollte ein europäischer Referenzrahmen sein, der bestehende Standards aufgreift, statt parallele Insellösungen zu erzeugen. Zugleich muss der Zugang zu Daten, Testumgebungen und qualifizierten Fachkräften verbessert werden. So entstehen Standortbedingungen, unter denen Systeme nicht nur entwickelt, sondern auch in Europa gefertigt, integriert und betrieben werden können.

Für die Standardisierung ist zudem ein gestuftes Vorgehen sinnvoll. Kurzfristig sollten WGP und Industrie zunächst ein gemeinsames Vokabular, Referenzaufgaben und Mindestanforderungen an Schnittstellen festlegen. Darauf aufbauend können Referenzimplementierungen und Prüfprofile entstehen, die in unabhängigen Testfeldern eingesetzt werden. Erst im nächsten Schritt sollten weitergehende Zertifizierungs- und Konformitätsverfahren entwickelt werden. Dieses Vorgehen verhindert, dass die Standardisierung den technologischen Fortschritt abwartet oder durch zu frühe Detailfestlegungen einschränkt.

Besondere Bedeutung hat die Beschreibung von Unsicherheit. Ein Produktionsroboter muss nicht nur eine Handlung ausführen, sondern auch anzeigen können, wie sicher er eine Wahrnehmung, eine Aufgabeninterpretation oder eine geplante Bewegung einschätzt. Für die sichere Zusammenarbeit mit Menschen sind daher Zustandsmodelle, Warnkonzepte und abgestufte Übergaben erforderlich. Ein standardisierter Informationsaustausch über Konfidenzen, Prozessgrenzen und erforderliche menschliche Eingriffe wäre ein wesentlicher Baustein für Vertrauen und Zulassungsfähigkeit.

6.3 Pilotanwendungen und Umsetzung

Der Übergang von der Forschung in die industrielle Anwendung sollte über klar abgegrenzte Pilotanwendungen erfolgen. Geeignet sind Aufgaben, bei denen variable Abläufe, häufige Umrüstungen oder ergonomisch belastende Tätigkeiten einen erkennbaren Mehrwert versprechen, ohne dass bereits zu Beginn eine vollständige Autonomie erforderlich ist. Pilotprojekte sollten deshalb mit einem definierten Unterstützungsziel starten. Der Roboter übernimmt ausgewählte Teilaufgaben, während Mitarbeitende die Prozessverantwortung behalten und das System schrittweise anleiten, überwachen und verbessern.

Aus heutiger Sicht sind die folgenden Pilotfelder prioritär.

- Material flexibel bereitstellen und innerbetrieblich transportieren.
- Kommissionierung und Montage bei hoher Variantenvielfalt unterstützen.
- Bestückung, Handhabung und Prüfung adaptiv ausführen.

- Ergonomisch belastende Greif-, Halte- und Positionieraufgaben entlasten.
- Rüsten, Warten und einfache Eingriffe in schwer zugänglichen Bereichen unterstützen.

Jeder Pilot sollte anhand eines einheitlichen Vorgehens geplant werden. Am Anfang stehen die Auswahl und Bewertung der Tätigkeit sowie die Festlegung des angestrebten Unterstützungsgrades. Anschließend werden Prozess, Umgebung, Datenbasis, Sicherheitskonzept und menschliche Rollen beschrieben. Der Demonstrator wird zunächst in Simulation und geschützter Umgebung erprobt und danach unter realen Bedingungen validiert. Zu messen sind nicht allein technische Kennzahlen wie Zykluszeit oder Erfolgsquote, sondern auch Verfügbarkeit, Lernaufwand, Integrationskosten, Akzeptanz, ergonomische Wirkung, Qualität und die Veränderung der Tätigkeit.

Die Politik sollte hierfür ein europäisches Pilotprogramm für Produktionsroboter mit humanoiden Eigenschaften auflegen. Es sollte Forschungseinrichtungen, Hersteller, Integratoren, Anwenderunternehmen und Beschäftigte verbindlich zusammenbringen und den Zugang zu neutralen Test- und Validierungsumgebungen sichern. Für diese Testumgebungen sind zudem geeignete rechtliche Rahmenbedingungen, etwa für den Umgang mit Daten, zu schaffen. Förderbedingungen sollten die Übertragbarkeit der Ergebnisse, offene Schnittstellen, Dokumentation und die Beteiligung von kleinen und mittleren Unternehmen voraussetzen. Parallel sind Qualifizierungsangebote für Bedienung, Training, Instandhaltung, Sicherheit und Prozessgestaltung aufzubauen.

Daraus folgt die zentrale Handlungsempfehlung. Deutschland und Europa sollten innerhalb der nächsten drei Jahre eine koordinierte Forschungs-, Standardisierungs- und Pilotagenda beschließen und mit ersten industriellen Anwendungen sichtbar umsetzen. Die WGP kann hierfür eine gemeinsame Plattform aus Wissenschaft und Praxis initiieren, priorisierte Aufgabenprofile definieren, Referenzarchitekturen und Bewertungsmethoden erarbeiten und die Ergebnisse regelmäßig mit Politik und Wirtschaft spiegeln.

Damit wird ein realistischer und zugleich ambitionierter Entwicklungspfad eröffnet. Produktionsroboter mit humanoiden Eigenschaften werden nicht als fertiges Universalprodukt eingeführt, sondern als modulare, aufgabenorientierte und lernfähige Systeme in bestehende Produktionskompetenzen integriert. Die Einführung sollte daher nicht an starren Konstruktionsmerkmalen wie einer bestimmten Körpergeometrie oder Fortbewegungsform ausgerichtet werden. Maßgeblich ist vielmehr, ob die gewählte Kombination aus Basis, Manipulation, Sensorik, Software, Werkzeugen und Sicherheitsfunktionen eine konkrete Produktionsaufgabe zuverlässig erfüllt. Der Nachweis erfolgt anhand der in Kapitel 4 genannten Kriterien Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit. So kann Europa seine Stärke in der Produktionstechnik nutzen, technologische Souveränität sichern und die Zukunft der Arbeit aktiv gestalten.

Für die Auswahl der Piloten sollten vier Kriterien maßgeblich sein. Erstens muss ein konkreter betrieblicher Bedarf vorliegen, etwa Variantenvielfalt, Fachkräftemangel oder ergonomische Belastung. Zweitens sollte die Aufgabe technisch hinreichend abgegrenzt sein, damit Fortschritte messbar werden. Drittens muss eine geeignete Daten- und Sicherheitsbasis vorhanden sein. Viertens sollte der Anwendungsfall auf weitere Unternehmen und Branchen übertragbar sein. Die Pilotierung darf sich damit nicht auf spektakuläre Demonstrationen beschränken, sondern muss belastbare Erkenntnisse für den späteren industriellen Betrieb erzeugen.

Ein sinnvoller Pilot endet nicht mit der Inbetriebnahme. Nach einer ersten Erprobungsphase sind die Ergebnisse gemeinsam mit den Beschäftigten zu bewerten und die Aufgabenverteilung gegebenenfalls anzupassen. Der Roboter muss sich an den realen Arbeitsablauf anpassen lassen. Umgekehrt benötigen auch die Mitarbeitenden Zeit, um neue Rollen und Verantwortlichkeiten zu erlernen. Eine erfolgreiche Einführung umfasst deshalb technische Iterationen, Qualifizierung, organisatorische Anpassungen und eine transparente Kommunikation über Ziele, Grenzen und Ergebnisse.

Die Umsetzung dieser Agenda erfordert geeignete Förderinstrumente. Erforderlich sind niederschwellige Formate des Bundes, die Forschungseinrichtungen und Unternehmen ohne hohen administrativen Aufwand zusammenbringen. Kurze Antragswege, überschaubare Laufzeiten und eine einfache Beteiligung kleiner und mittlerer Unternehmen sind dafür entscheidend. Die in Abschnitt 5.5 beschriebenen Transferstrukturen bieten hierfür einen tragfähigen Ausgangspunkt. Die WGP bringt ihre produktionstechnische Expertise ein und wirkt daran mit, Produktionsroboter mit humanoiden Eigenschaften von der Forschung in die industrielle Anwendung zu überführen.

Literatur

[1] International Organization for Standardization (ISO) (2021) ISO 8373:2021. Robotics – Vocabulary. Geneva: ISO.

[2] International Federation of Robotics (IFR) (2025) Position Paper on Humanoid Robotics. Online verfügbar unter https://ifr.org/papers/humanoid-robots-vision-and-reality.

[3] Universität Stuttgart (2026) Magazin des Stuttgarter Maschinenbaus, Ausgabe 10. Online verfügbar unter https://www.verbund.uni-stuttgart.de/maschinenbau/dokumente/260601__SMB_MAG_10_kl.pdf.

[4] Kurth J (o. J.) Humanoide Roboter in der Produktion – was spricht dafür und was dagegen? Automationspraxis. Online verfügbar unter https://automationspraxis.industrie.de/ki/humanoide-roboter-in-der-produktion-was-spricht-dafuer-und-was-dagegen.

[5] Fraunhofer-Gesellschaft (o. J.) The Humanoid Hardware Value Chain. Can the European Manufacturing Industry Capitalize on the Humanoid Momentum? https://doi.org/10.24406/publica-7314.

[6] Statista (o. J.) Deutschland auf Rang 5 bei Startups für humanoide Robotik. Online verfügbar unter https://de.statista.com/infografik/35777/anzahl-der-startups-im-bereich-humanoide-robotik-nach-laendern/.

[7] Jeske T, Braun S, Harlacher M, Guth M (2025) Humanoide Roboter in der Produktion. Einsatzszenarien und Forschungsfragen. In: GfA (Hrsg) Arbeit 5.0. Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit. Bericht zum 71. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 26. bis 28. März 2025. Dortmund: GfA-Press, S 981-986.

[8] Fraunhofer IPA (o. J.) Embodied AI in der Industrie. KI in Maschinen, die wahrnimmt, lernt und handelt. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/de/loesungen/embodied-ai-in-der-industrie.html.

[9] Li W, Yang G, Wu J, Pan C, Sheng L, Zhang Q (2026) A Comprehensive Review on Humanoid Robots. Perspectives from Academia and Industry. Engineering Information Technology & Electronic Engineering 27(2):1-37. https://doi.org/10.1631/ENG.ITEE.2025.0105.

[10] BusAnthroInc (2025) Form Follows Function. A Critical Examination of Anthropomorphic Robot Design. Online verfügbar unter https://www.businessanthropology.net/post/form-follows-function-a-critical-examination-of-anthropomorphic-robot-design.

[11] Schmidt S, Beck J, Höltge L, Huber A, Awad R (2025) Humanoide Roboter – Game Changer oder Irrweg? Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e. V. https://doi.org/10.24406/publica-4222.

[12] Bin T, Yan H, Wang N, Nikolić MN, Yao J, Zhang T (2024) A survey on the visual perception of humanoid robot. Biomimetic Intelligence and Robotics 100197. https://doi.org/10.1016/j.birob.2024.100197.

[13] Peng K, Li Q, He Z, Zhang B, Fu X, Li B, Wang X, Cheng ZQ, Yan Y, Peng X (2026) A survey of robotic manipulation. From bottom-up approaches to end-to-end paradigms with LLMs. Neurocomputing 674:132921. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2026.132921.

[14] Alipourvarmazabadi M, Ebner M (2026) Robot localization. A comprehensive survey from classical methods to intelligent autonomy. International Journal of Intelligent Robotics and Applications. https://doi.org/10.1007/s41315-026-00528-9.

[15] Cao L (2025) Humanoid Robots and Humanoid AI. Review, Perspectives and Directions. ACM Computing Surveys 1-37. https://doi.org/10.1145/3770574.

[16] Meng X, Yu Z, Chen X, Huang Z, Meng F, Huang Q (2024) Online Adaptive Motion Generation for Humanoid Locomotion on Non-Flat Terrain via Template Behavior Extension. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 6563-6574.

[17] Mahdi H, Akgun SA, Saleh S, Dautenhahn K (2022) A survey on the design and evolution of social robots. Past, present and future. Robotics and Autonomous Systems 156:104193.

[18] Tanevska A, Rea F, Sandini G, Cañamero L, Sciutti A (2020) A Socially Adaptable Framework for Human-Robot Interaction. Frontiers in Robotics and AI 121.

[19] Dell'Anna D, Jamshidnejad A (2024) SONAR. An Adaptive Control Architecture for Social Norm Aware Robots. International Journal of Social Robotics 16:1969-2000.

[20] Bai S, Song W, Chen J, Ji Y, Zhong Z, Yang J, Chen B (2025) Towards a Unified Understanding of Robot Manipulation. A Comprehensive Survey. arXiv preprint 2510.10903.

[21] Wu Y, Chen Z, Wu F, Chen L, Zhang L, Bing Z, Knoll A (2025) TacDiffusion. Force-Domain Diffusion Policy for Precise Tactile Manipulation. 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S 11831-11837. Atlanta: IEEE.

[22] Xue H, Ren J, Chen W, Zhang G, Fang Y, Gu G, Lu C (2025) Reactive Diffusion Policy. Slow-Fast Visual-Tactile Policy Learning for Contact-Rich Manipulation. arXiv preprint 2503.02881.

[23] Bi H, Wu L, Lin T, Tan H, Su Z, Su H, Zhu J (2026) H-RDT. Human Manipulation Enhanced Bimanual Robotic Manipulation. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence 40(22), S 18135-18143. Singapore: AAAI.

[24] Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) (2023) VDW-Marktbericht 2023. Online verfügbar unter https://www.vdma.eu/documents/34570/4890932/VDW-Marktbericht-2023.pdf.

[25] Procedia CIRP (2012) Online verfügbar unter https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112001862.

[26] Wensing PM, Wang A, Seok S, Otten D, Lang J, Kim S (2017) Proprioceptive Actuator Design in the MIT Cheetah. IEEE Transactions on Robotics 33(3):509-522.

[27] Albu-Schäffer A, Haddadin S, Ott C, Stemmer A, Wimböck T, Hirzinger G (2007) The DLR lightweight robot. Industrial Robot 34(5):376-385.

[28] Seok S et al. (2015) Design Principles for Energy-Efficient Legged Locomotion. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 20(3):1117-1129.

[29] Urata J, Hirose T, Namiki Y, Nakanishi Y, Mizuuchi I, Inaba M (2008) Thermal control of electrical motors for high-power humanoid robots. IEEE/RSJ IROS, S 2047-2052. https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4651110.

[30] Paine N, Sentis L (2015) Design and Comparative Analysis of a Retrofitted Liquid Cooling System for High-Power Actuators. Actuators 4(3):182-202.

[31] Sevinchan E, Dincer I, Lang H (2018) A review on thermal management methods for robots. Applied Thermal Engineering 140:799-813.

[32] Raviola A, De Martin A, Sorli M (2022) A Preliminary Experimental Study on the Effects of Wear on the Torsional Stiffness of Strain Wave Gears. Actuators 11(11):305. https://doi.org/10.3390/act11110305.

[33] Guida R, Bertolino AC, De Martin A, Mauro S, Sorli M (2023) Effect of Wave Generator Misalignment on the Strain Wave Gear Hysteretic Behavior. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45709-8_16.

[34] International Electrotechnical Commission (IEC) (2016) IEC 61800-5-2:2016. Adjustable speed electrical power drive systems, Part 5-2. Safety requirements – Functional. Geneva: IEC.

[35] International Organization for Standardization (ISO) (2025) ISO 10218-1:2025. Robotics – Safety requirements for industrial robots, Part 1. Robots. Geneva: ISO.
[36] International Organization for Standardization (ISO) (2025) ISO 10218-2:2025. Robotics – Safety requirements for industrial robots, Part 2. Robot applications and robot cells. Geneva: ISO.
[37] Fortune (2026) Bericht zum globalen Markt humanoider Roboter. 09.06.2026.
[38] Schaeffler AG (2025) Schaeffler und Neura Robotics kooperieren bei Schlüsselkomponenten für humanoide Roboter. Pressemitteilung vom 04.11.2025.
[39] Automobil Industrie (2026) Bosch und Neura Robotics kooperieren bei Hard- und Software.
[40] Europäische Union (2023) Verordnung (EU) 2023/1230 über Maschinen. Amtsblatt der Europäischen Union L 165 vom 29.06.2023.
[41] Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) (2025) ProKI-Netzwerk.
[42] LOGISTIK HEUTE (2026) Humanoide Roboter. BMW setzt Figure 03 in der Produktionslogistik in Spartanburg ein. Online verfügbar unter https://logistik-heute.de/news/humanoide-roboter-bmw-setzt-figure-03-der-produktionslogistik-spartanburg-ein-271446.html.
[43] W. Gessmann GmbH (2026) GESSbot Duo. Online verfügbar unter https://www.gessmann.com/de/anwendung/gessbot-duo/.
[44] Automationspraxis (2026) Humanoide Roboter. Der mühsame Weg zum sicheren Betrieb. Online verfügbar unter https://automationspraxis.industrie.de/news/humanoide-roboter-der-muehsame-weg-zum-sicheren-betrieb/.
[45] Fraunhofer IPA (o. J.) Humanoid Capabilities Navigator. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/humanoid-capabilities-navigator.html.
[46] Roland Berger (2026) Humanoid Robots 2026. The Convergence Moment for a New Market. Online verfügbar unter https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/Roland_Berger_Humanoid_Robots_2026.pdf.
[47] VDMA (2026) Humanoid Robotics 2040. Future-Business-Studie. Frankfurt am Main: VDMA.
[48] Gamarra, Merz, Franke, Reitelshöfer (2025) Advancements and Challenges in Humanoid Robots for Industrial Applications. Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2025).
[49] Peta et al. (2025) Comparison of Single-Arm and Dual-Arm Collaborative Robots in Precision Assembly. Applied Sciences 15(6).
[50] Napoleone A, Andersen AL, Brunoe TD, Nielsen K (2023) Towards human-centric reconfigurable manufacturing systems. Literature review of reconfigurability enablers for reduced reconfiguration effort and classification frameworks. Journal of Manufacturing Systems 67.
[51] Núñez-Calvo et al. (2025) Enhancing accuracy in Mobile Manipulators. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 96.
[52] Kekshin et al. (2025) Collaboration Between Industrial, Collaborative, Humanoid Robots and Humans. Journal of Machine Engineering 25(2).
[53] Generalist AI (o. J.) Towards Machines with a Thousand Hands. Online verfügbar unter https://generalistai.com/blog/towards-machines-with-a-thousand-hands.