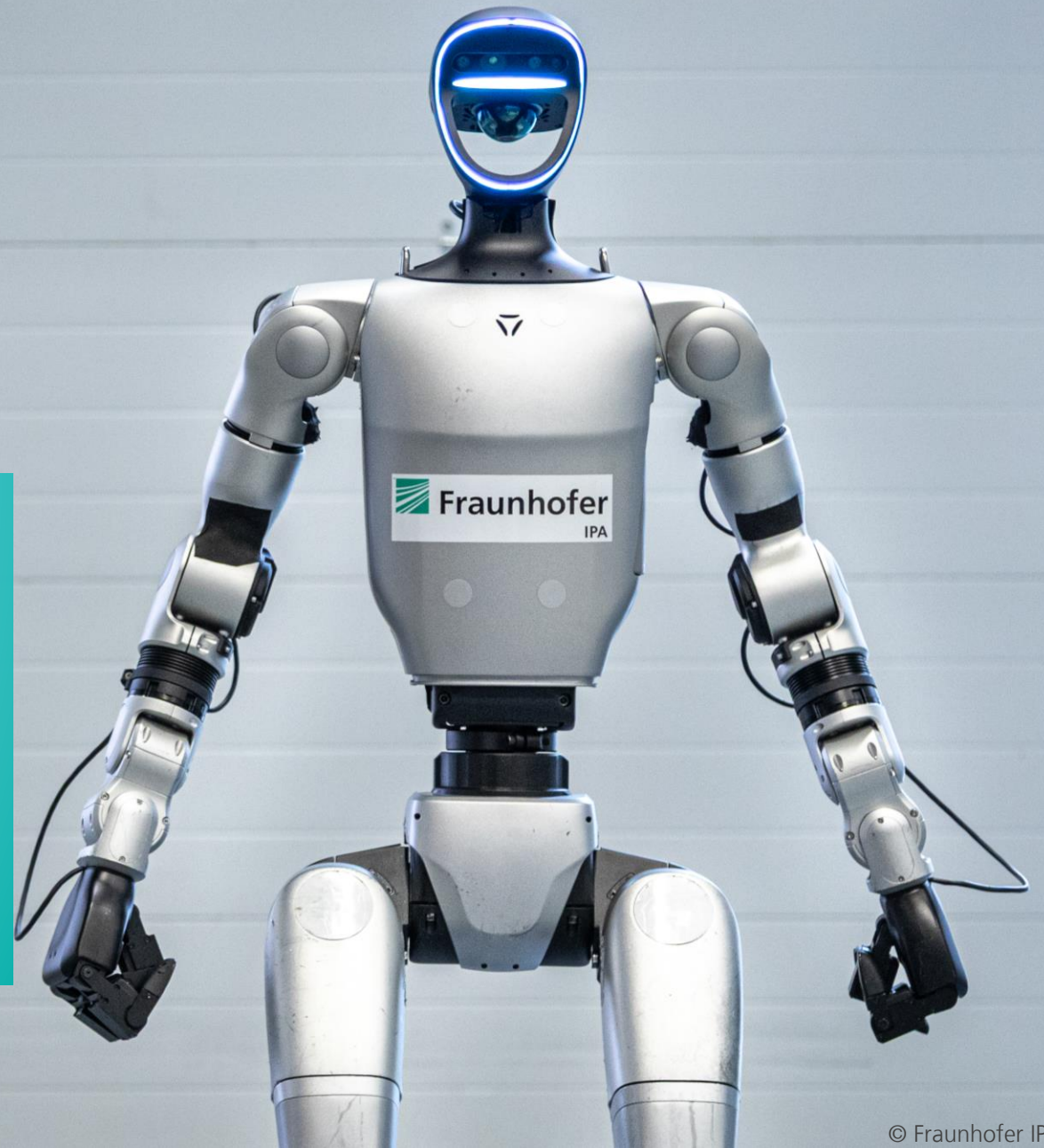


Fraunhofer IPA
Forschungsteam Automatisierungsplanung

Leitfaden Wirtschaftlichkeit Humanoider Roboter



Leitfaden Wirtschaftlichkeit

1. Einführung

2. Definition Humanoider Roboter und Humanoides Robotersystem

3. Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

4. Umfrage: Einsatzszenarien humanoider Roboter

5. Anwendungsbeispiele

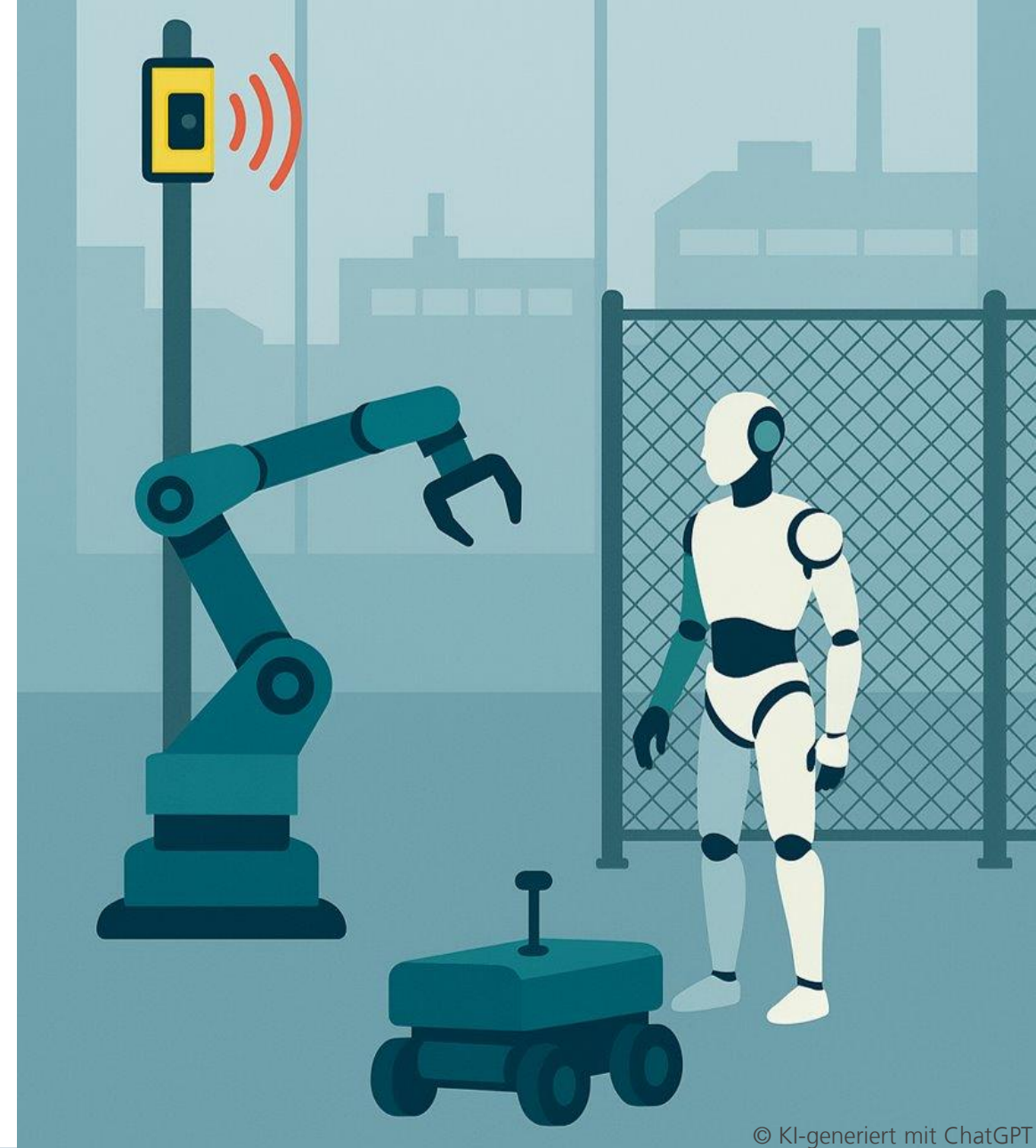
6. Zusammenfassung

1. Einführung

Humanoide Roboter sollen im industriellen Umfeld neue Möglichkeiten eröffnen, da sie **flexibel** in bestehende Arbeitsumgebungen integriert werden können und Werkzeuge sowie Maschinen nutzen, die ursprünglich **für Menschen entwickelt** wurden. Sie sollen eine Antwort auf den zunehmenden **Fachkräftemangel** bieten, indem sie zum einen körperlich belastende, monotone oder gefährliche Aufgaben übernehmen und zum anderen zukünftig durch Einsatz im 3-Schicht-Betrieb die **Kosten senken**. Durch die humanoide Ergonomie versprechen sich Hersteller und potenzielle Anwender eine erleichterte Zusammenarbeit mit Menschen, eine **gesteigerte Produktivität** und Sicherheit und damit einen echten Mehrwert für moderne Produktionsprozesse.

Neben der technologischen Machbarkeit und Sicherheit ist die **Wirtschaftlichkeit** ein gravierender Faktor, der letztlich über den Erfolg Humanoider im industriellen Umfeld entscheiden wird.

Dieser Leitfaden soll als Anhaltspunkt dienen, welche **Faktoren** bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung **berücksichtigt** werden müssen, und gibt drei anschauliche Beispiele.



© KI-generiert mit ChatGPT

2. Definition Humanoider Roboter und Humanoiden-Robotersystem

Es gibt noch keine einheitliche Definition von humanoiden Robotern und deren Abgrenzung zum Humanoiden-Robotersystem. Mit einer breiten Definition versuchen wir viele Designs (z.B. radbasierte) mit einzuschließen, um viele zukünftig verfügbare Systeme abzudecken.

Ein Humanoider Roboter...

Gestalt

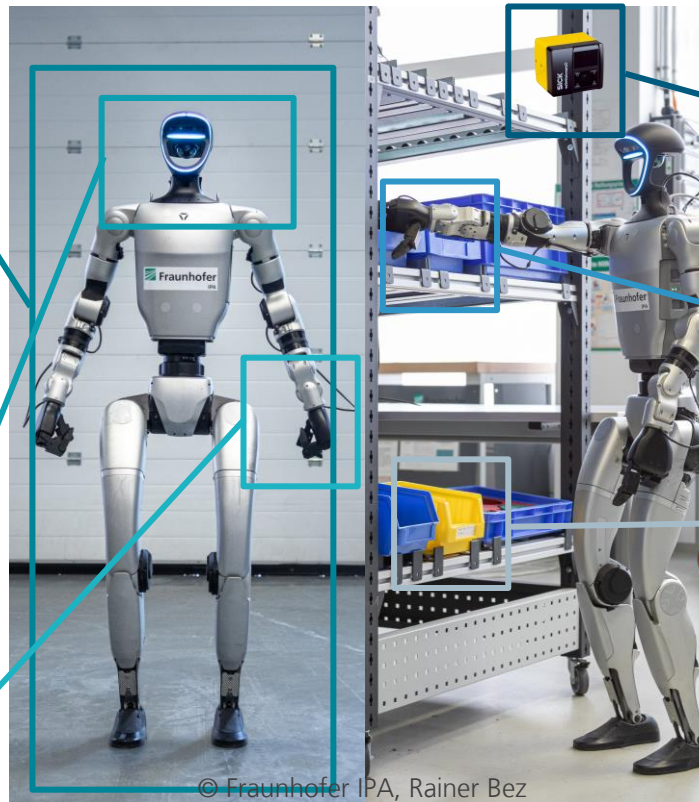
- ... muss über eine menschenähnliche Gestalt mit einem Oberkörper und zwei Armen verfügen
- ... muss über zwei Beine oder über andere geeignete Fortbewegungsmittel verfügen
- ... kann über einen Greifer verfügen (der Greifer ist ansonsten Teil des Humanoiden-Robotersystems)
- ... kann über einen Kopf verfügen

Sensorik

- ... muss über Sensorik zur Erfassung der Umgebung verfügen

Autonomie

- ... muss unterschiedlichste, für den Menschen angelegte Tätigkeiten ausüben können
- ... kann einen hohen Autonomiegrad aufweisen
- ... kann teleoperiert betrieben werden



© Fraunhofer IPA, Rainer Bez

Ein Humanoiden-Robotersystem...

Sicherheit

- ... sollte über Sicherheitseinrichtungen und -maßnahmen verfügen, um eine Kollaboration mit dem Menschen zu ermöglichen

Werkzeuge

- ... muss über einen Greifer oder andere End-Effektoren verfügen, die als spezialisierte Tools am Handgelenk angebracht werden

Systemkomponenten

- ... muss aus mindestens einem humanoiden Roboter, Werkstücken, Peripheriekomponenten und Ladeinfrastruktur bestehen

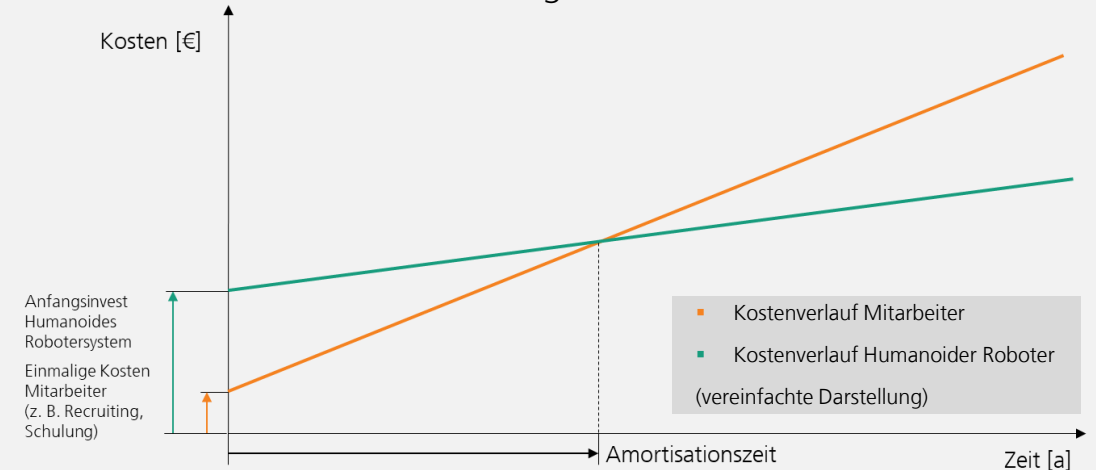
3. Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann die Amortisationsrechnung herangezogen werden. Die Amortisationsrechnung berechnet die Rückflussdauer einer Investition. In den Beispielen werden sowohl die Investitionen und einmaligen Kosten wie auch die im Betrieb laufenden Kosten für den Einsatz eines Humanoiden Robotersystems betrachtet.

Vergleich potenzieller Kostenfaktoren eines Humanoiden Robotersystems zu Mitarbeiter/-in

	Humanoides Robotersystem	Mitarbeiter
Einmalige Kosten	- Investition Roboter, Peripherie und Steuerungssystem - Integration in bestehende Systeme - Mitarbeiterschulung	- Kosten für die Mitarbeiterschulung/Einarbeitung - Einstellungsprozesskosten - Ausstattungskosten
Laufende Kosten	- Energieverbrauch Roboter - Wartung - Mitarbeiterkosten Planung	- Lohnkosten - Lohnnebenkosten - Verwaltungskosten

Bestimmung der Amortisationszeit



$$Amortisationszeit^* = \frac{\sum Investitionen + \sum Jährliche Kosten - Restwert}{Jährlicher Rückfluss}$$

Autonom arbeitende humanoide Roboter haben den Vorteil, dass sie bei zeitunkritischen Prozessen nachts durcharbeiten können. Dies kann positive Auswirkungen auf die Amortisationszeit haben. Bei zeitkritischen, getakteten Aufgaben ist dies nicht möglich. Sollte die Leistung eines Roboters nicht ausreichen, müssen weitere beschafft werden, was sich negativ auf die Amortisationszeit auswirkt.

*David Müller: *Investitionsrechnung und Investitionscontrolling*. 2019, Springer, [ISBN 978-3-662-57609-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57609-0), S. 335ff

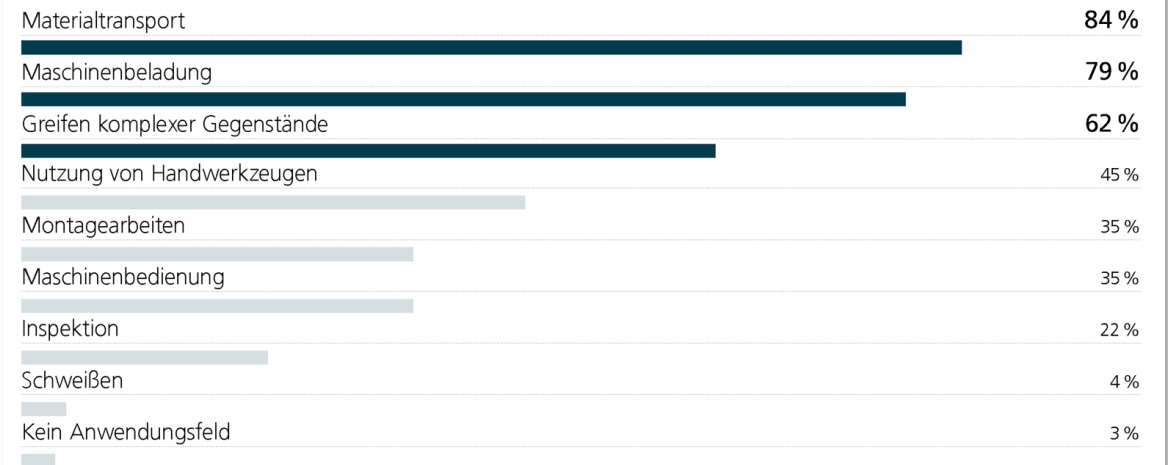
4. Umfrage: Einsatzszenarien humanoider Roboter

Für die Einsatzszenarien wurden drei Anwendungen gewählt, die laut [Umfrage](#) das größte Potenzial für die Implementierung von Humanoiden Robotern haben:

- **Materialtransport aus einem Lager zur Station/Linie**
- **Kommissionieren/Kitten von Aufträgen/Bestellungen im Warenlager**
- **Montagearbeiten**

Humanoide Roboter haben zum aktuellen Zeitpunkt begrenzte Fähigkeiten. Die Anwendungsszenarien auf den folgenden Seiten sind angelehnt an Praxisbeispielen. Um diese hinsichtlich ihrer Komplexität kategorisieren zu können, wurden morphologische Kästen erarbeitet.

Einsatzszenarien für Humanoide Roboter in der Produktion und Logistik



(n=113), Anwendungsfelder für Humanoide Roboter, Mehrfachauswahl möglich

Quelle: Humanoide Roboter – Game Changer oder Irrweg?, <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/humanoide-roboter.html>, abgerufen am 01.10.2025



Wirtschaftlichkeits- betrachtung Anwendungsbeispiele

5.1 Anwendungsbeispiele: Materialtransport

- Der morphologische Kasten beinhaltet eine Einschätzung auf Basis frei zugänglicher Informationen unterschiedlicher Hersteller Humanoider Roboter, welche dieser Ausprägungen aktuell umsetzbar sind bzw. in naher Zukunft sein werden.^{1,2}
- Das nachfolgende Beispiel fokussiert sich auf kleine bis mittlere Gewichte, starre, ungefährliche Materialien und Transport ohne Hilfsmittel und auf Strecken ohne große Hindernisse.

Materialtransport als Anwendung für Humanoide Roboter ist vielversprechend, solange bestimmte Voraussetzungen vorliegen, wie wenige Hindernisse auf der Strecke, kleine Mengen an zu transportierendem Gut und ein separater Bereich für den Roboter bzw. ein Sicherheitskonzept für den Mischbetrieb.

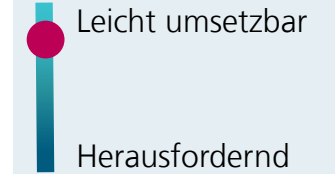
Leicht umsetzbar

Herausfordernd

- Im nachfolgenden Beispiel betrachtet
- Derzeit mit humanoiden Roboter nicht (wirtschaftlich) durchführbar

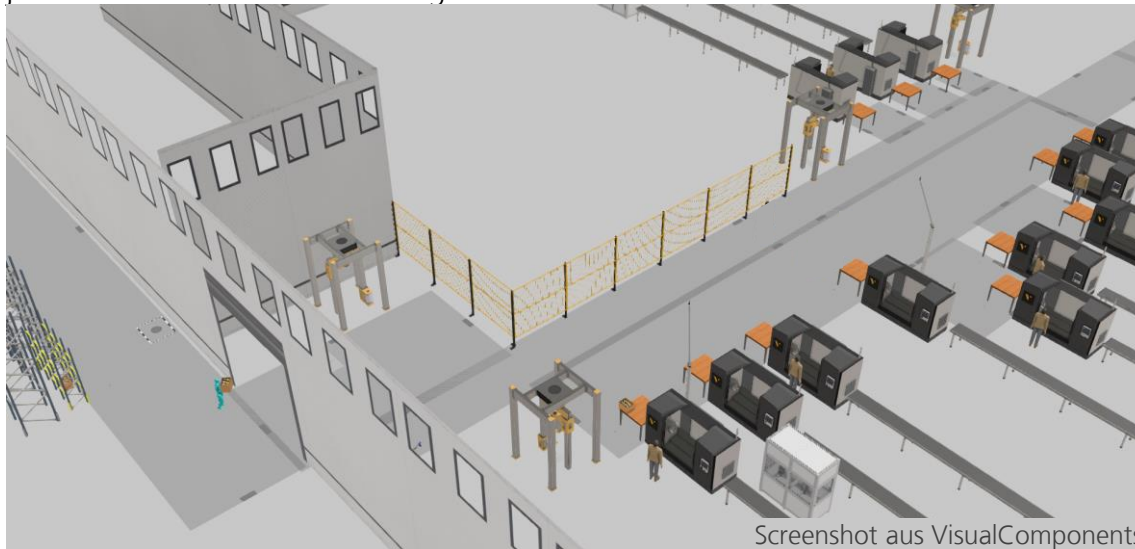
Transportgut	Transporthilfsmittel	Transportstrecke
Aggregat-zustand Fest Flüssig, kann auslaufen	Transportfahrzeug Trolley / Wagen Ameise / Gabelstapler Rollenförderer / Rollenband Nicht vorhanden	In / Outdoor Innenbereich Gebäudeübergreifend
Größe Kleinteile Handgroß Groß, beide Hände notwendig		Steigungen Ebene Strecke Steigungen Stockwerkübergreifend
Gewicht Marginal klein (<100g) 0,1 kg < Gewicht < 3 kg 3 kg < Gewicht < 20 kg > 20 kg	Lastübergabe/-nahme Ort Definierte Position Definiert, mehrere Positionen Undefiniert	Hindernisse Keine Hindernisse, Stolperfallen vorhanden
Stabilität Starr, konstanter Schwerpunkt Instabil, variabler Schwerpunkt		Tore Keine Manuell ansteuerbar automatisch ansteuerbar
Empfindlichkeit Unzerbrechlich Zerbrechlich	Organisation Auftrags-ermittlung Laufzettel Laufzettel, digitale Erfassung Automatische Übermittlung	Interaktion Separate Bewegungsbereiche Mischbetrieb Gemeinsamer Arbeitsbereich
Gefahrstoff Ungefährlich Gefährlich		

5.1 Anwendungsbeispiele: Materialtransport



Beschreibung der Aufgabe

Der Arbeitsinhalt besteht aus der Aufnahme und Transport von Kleinteilen in einem Kleinladungsträger (KLT) aus einem Kanban-Regal an Produktionslinien nach Anforderung mit einem Unitree G1. Es wird angenommen, dass an den jeweiligen Stationen eine feste Übergabeposition definiert ist. Lager und Stationen befinden sich in Hallen, die durch Wände getrennt sind. Es gibt keinen direkten Kontakt zwischen Mensch und Roboter. Etwa alle zwei Stunden muss eine leere Kiste an jeder Linie durch eine neue ausgetauscht werden.



Eckdaten

Parameter	Wert
Anzahl an Linien	14
Durchschnittliche Wegstrecke	35 m
Zeit bis zur neuen Anforderung von KLT	2 h
Art der Flächennutzung	Mischbetrieb mit Hindernissen
Kosten Mitarbeiter (Produktion/Logistik)	33 € / h (+1€ / h Steigerung pro Jahr)
Anzahl Arbeitstage pro Monat*	21
Anzahl Schichten	2
Arbeitszeit pro Schicht*	7,5 h

Geschwindigkeiten Roboter	Unitree G1
Laufen*	750 mm/s
Laufen (bepackt)*	500 mm/s
Drehen*	30 °/s
Aufnahme/Ablage KLT*	12 s
Akkulaufzeit Roboter*	120 min
Zeitaufwand Batteriewechsel*	10 min

*Werte gelten ebenfalls für die weiteren Anwendungsszenarien

5.1 Anwendungsbeispiele: Materialtransport

Kostenpunkte Roboter

Basierend auf vereinfachten Annahmen

Invest Hardware (Roboter, 2-Fingergreifer, System) + Inbetriebnahme	100.000 €
Engineeringaufwand	15.200 €
Energiekosten	5 €/ Schicht
Wartungskosten	2.000 €/ a

Kostenpunkte Mitarbeiter Produktion

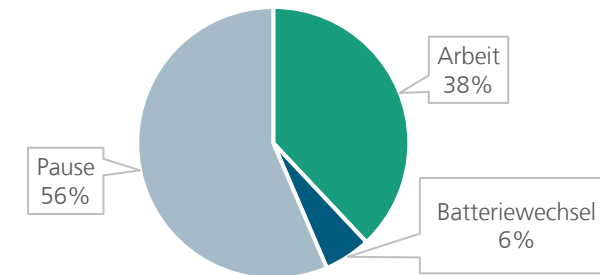
Einstellung + Einlernen	10.000 €
Lohnkosten inkl. Lohnnebenkosten im ersten Jahr	33 €/ h (+1€/ h Steigerung pro Jahr)

Ergebnisse aus Simulation

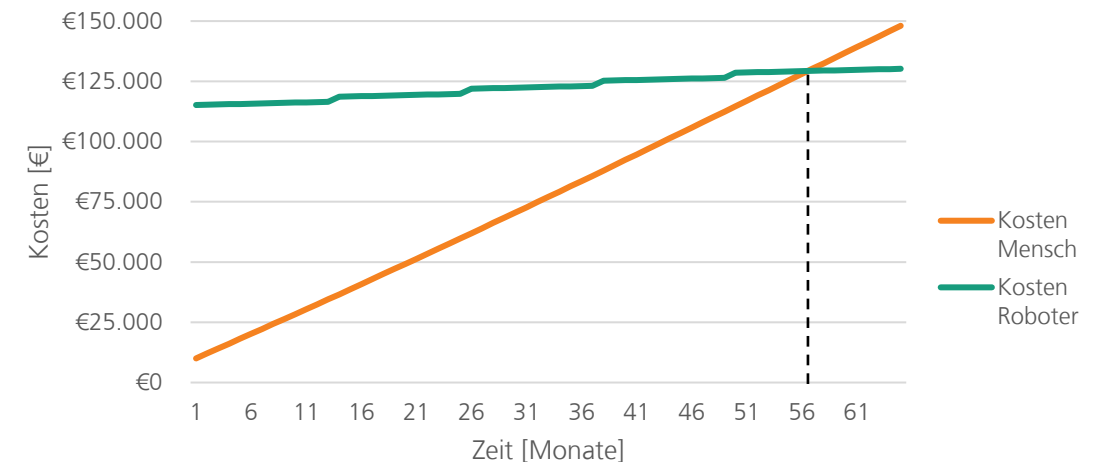
Durchschnittliche Zeit für Gang ohne KLT (eine Richtung)	~60 s
Durchschnittliche Transportzeit mit KLT (eine Richtung)	~80 s
Arbeitszeit Ausstattung aller leeren Linien mit einem KLT	39:16 min 0,65 h
Arbeitszeit Austausch der KLT an allen Stationen	43:56 min 0,73 h
Auslastung Roboter pro Tag mit 2 Schichten (inklusive Batteriewechsel)	0,44 FTE 376:00 min 6,3 h
Referenz: Arbeitszeit Mensch für Austausch der KLT an allen Stationen	22:09 min 0,37 h
Referenz: Arbeitszeit Mensch pro Tag (2 Schichten)	166:42 min 2,78 h

Fallbeispiel: Austausch leerer KLT an allen Linien: $14 * (80s * 2 + 12s * 2) + 60s = 43:56 \text{ min}$
 $1 \text{ Leergang} + \text{Anzahl an Linien} * (\text{Transportzeit eine Richtung} * 2 + \text{Zeit Auf-/Ablegen Box} * 2)$

Auslastung Roboter pro Tag

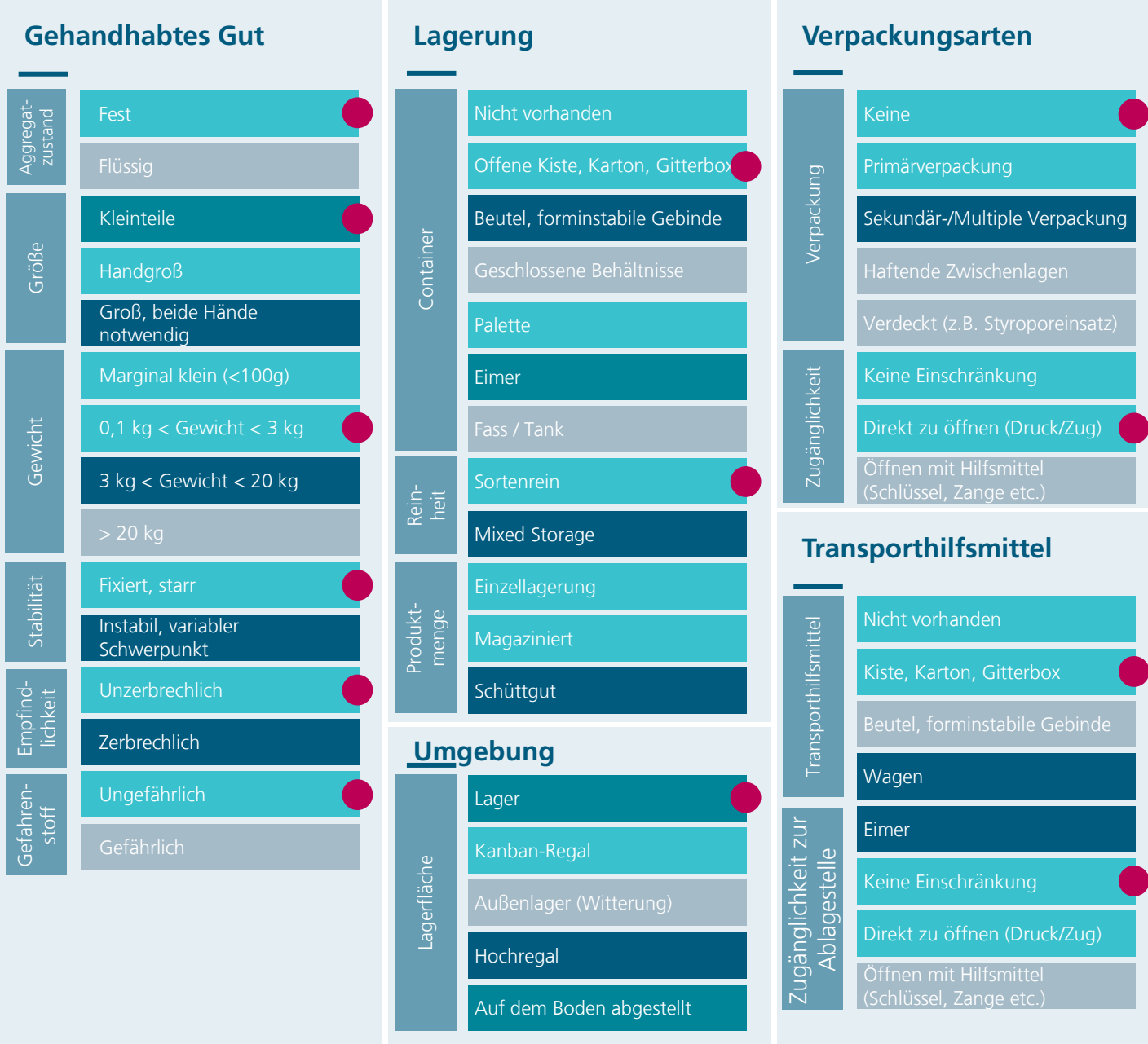


Amortisationszeit »Materialtransport«



Die Amortisationszeit liegt bei dieser Anwendung bei leicht über 4,5 Jahren.* Der Roboter ist jedoch nur zur Hälfte ausgelastet. Eine Übernahme einer weiteren, zeitunkritischen Tätigkeit kann die Amortisationszeit verkürzen, sofern der Engineeringaufwand für die weitere Aufgabe nicht zu hoch ist und der Erfüllungsort in der Nähe des aktuellen Bereichs liegt.

*: Amortisationszeit basierend auf der Simulation und der Annahme, dass der erforderliche Technologiereifegrad besteht und die Lösung in Kleinserie eingesetzt wird.



5.2 Anwendungsbeispiele: Kommissionieren

- Die ausgewählte Anwendung beinhaltet ein Szenario mit vergleichsweise wenigen Herausforderungen wie forminstabilen Verpackungen oder sich verhakenden Bauteilen.
- Es wurde ein Beispiel gewählt, welches den Kontakt zwischen Mensch und Roboter auf ein Minimum reduziert.

Das Kommissionieren hat den Vorteil, dass der Kontakt zu Menschen auf ein Minimum reduziert werden kann, je nach der Organisation und dem Layout der Logistik.

Je nach Menge der zu kommissionierenden Teile kann der Engineeringaufwand durch das Trainieren der vielen verschiedenen Teile stark steigen.

Leicht umsetzbar

Herausfordernd

Im nachfolgenden Beispiel betrachtet

Derzeit mit humanoiden Roboter nicht (wirtschaftlich) durchführbar

5.2 Anwendungsbeispiele: Kommissionieren

Beschreibung der Aufgabe

Der Rahmen des Szenarios ist die Fertigung von chirurgischen Instrumenten. Für die Auftragsabwicklung müssen je nach Auftrag verschiedene Halbzeuge aus dem Zwischenlager für den Endschliff und die Montage entnommen werden. Am Eingang des Lagers befindet sich eine Ablagestelle für die Kisten. Ein Auftrag besteht aus mehreren Produkten, wobei ein Produkt immer aus insgesamt vier Einzelteilen und einer Kiste besteht.

Eckdaten

Parameter	Wert
Größe des Lagers	2 x 4 m 8 m ²
Anzahl an Waren	192
Anzahl an unterschiedlichen Einzelteilen je Produkt	3
Anzahl an Teilen je Produkt	5
Produkte je Auftrag	3
Anzahl an Aufträgen pro Schicht	50
Gewicht der Einzelteile	< 1kg
Sortenreinheit	liegt vor
Position der Kiste	Definiert



Abb.: Darstellung Kommissionierkiste mit vereinfachten Modellen (Ausschnitt aus Simulation mit Visual Components)

5.2 Anwendungsbeispiele: Kommissionieren

Kostenpunkte Roboter

Invest Hardware (Roboter, Roboterhände + System) + Inbetriebnahme	120.000 €
Engineeringaufwand	45.500 €
Energiekosten	5 € / Schicht
Wartungskosten	2.000 € / a

Kostenpunkte Mitarbeiter Logistik

Einstellungsprozess + Anlernen	10.000 €
Lohnkosten inkl. Lohnnebenkosten im ersten Jahr	23 € / h (+1 € / h Steigerung pro Jahr)

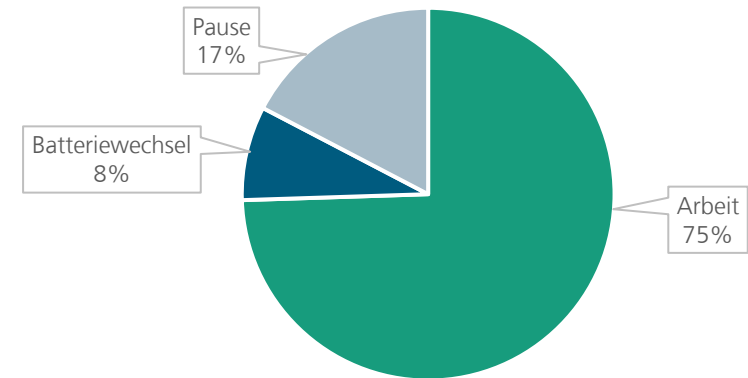
Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Anzahl an zu kommissionierenden Aufträgen je Schicht	50
Anzahl Schichten	1
Arbeitszeit pro Schicht	7,5 h

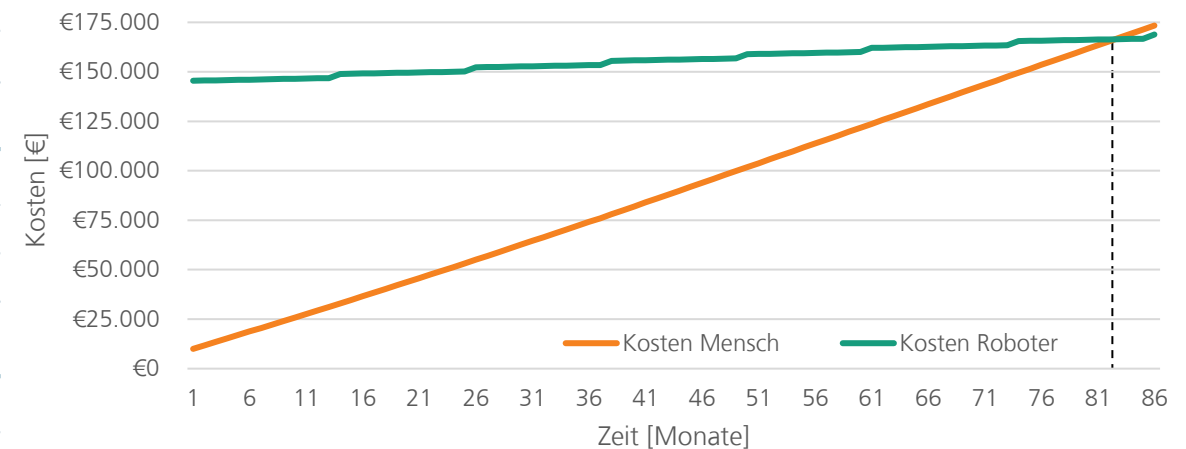
Ergebnis Simulation

Arbeitszeit je Auftrag (Roboter)	6:58 min
Arbeitszeit je Auftrag (Mensch, Referenz)	4:22 min
Auslastung Roboter	83%
Weitere Erkenntnisse	Roboter FTE = 0,62 Ein Arbeiter wird vsl. mehrere Teile zusammentragen, wodurch sich die Referenzzeit weiter verkürzt.

Auslastung Roboter pro Tag



Amortisationszeit »Kommissionieren«



Die Amortisationszeit liegt bei diesem Anwendungsbeispiel bei ca. 7,8 Jahren.* Durch die geringen Lohnkosten in der Logistik sowie Engineeringaufwand ist der Einsatz des Roboters in diesem Szenario zum aktuellen Zeitpunkt wirtschaftlich nicht verargumentierbar.

*: Amortisationszeit basierend auf der Simulation und der Annahme, dass der erforderliche Technologiereifegrad besteht und die Lösung in Kleinserie eingesetzt wird.

Fügeverfahren

Fügeverfahren	Stecken	●
	Pressen	
	Kleben	
	Verschrauben	●
	Nieten	
	Schweißen	
	Löten	
	Klemmen	
	Justage	
Werkzeug-einsatz	Nicht notwendig	
	Notwendig	●

Fügestellen

Füge-bewegungen	Linear	
	Bahn	
	Sensorgeführt	●
Toleranzen	Fein	●
	Mittel	
	Grob	

Fertigungsorganisationen

Arbeitsplatz-anordnung	Werkstattfertigung	●
	Fließbandfertigung	
	Baustellenmontage	
Arbeitsanweisung	Nicht vorhanden	
	Papier / Handbuch	
	Digital	●
Mitarbei-teranzahl	Assistenzsystem (AR, ..)	
	Separierter Bereich	●
	Gemeinsamer Arbeitsraum	

Bauteileigenschaften

Größe / Gewicht	Klein, Leicht, Feines Bauteil	●
	Mittelgroß, bis 10 kg	
	Nur mit Hilfsmitteln handhabbar	
Steifigkeit	Starr	●
	Elastisch	
	Biegeschlaff	
Empfind-lichkeit	Unempfindlich	●
	Kratz-, Bruch-, Formempfindlich	

5.3 Anwendungsbeispiele: Montage

- Die Montage hat wesentlich höhere Anforderungen an die Feinfühligkeit der Finger und die Positioniergenauigkeit verglichen mit den vorherigen Anwendungen.
- Es wurde eine Anwendung gewählt, die keine feinen Bauteile oder Strukturen beinhaltet.

Technologisch ist die Montage die Anwendung mit den größten Herausforderungen.

Leicht umsetzbar
Herausfordernd

● Im nachfolgenden Beispiel betrachtet
■ Derzeit mit humanoiden Roboter nicht (wirtschaftlich) durchführbar

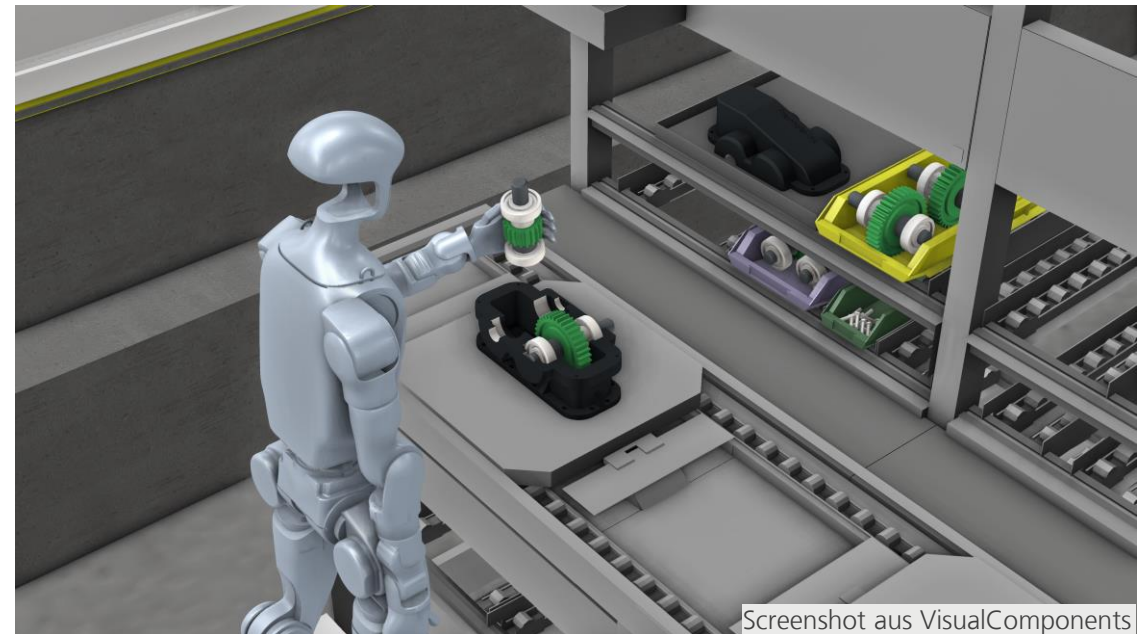
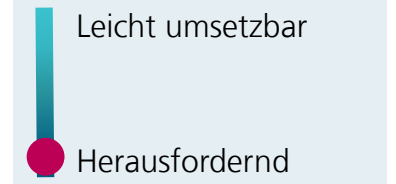
5.3 Anwendungsbeispiele: Montage

Beschreibung der Aufgabe

Als Beispiel wurde der Montagearbeitsplatz-Demonstrator am Fraunhofer IPA gewählt. Die Aufgabe ist die Montage eines einstufigen Getriebes. Dafür müssen die vormontierten Wellen aus der Bereitstellung in das Gehäuse eingesetzt werden, die Gehäuseoberseite aufgesetzt und das Gehäuse mit Schrauben verschlossen werden. Die Schrauben liegen als Schüttgut in einem KLT bereit. Der Roboter arbeitet stationär am Arbeitsplatz. Für die Bereitstellung der Einzelteile muss eine zusätzliche Person sorgen.

Eckdaten

Parameter	Wert
Anzahl an Bauteilen	8
Anzahl an Arbeitsplätzen	1
Montageschritte	▪ Einlegen Antriebswelle ▪ Einlegen Abtriebswelle ▪ Auflegen Gehäuseoberseite ▪ Schraube mit automatischer Zuführung (4x)



5.3 Anwendungsbeispiele: Montage

Kostenpunkte Roboter

Invest Hardware (Roboter, Roboterhände + System) + Inbetriebnahme	120.000 €
Engineeringaufwand	91.000 €
Energiekosten	10 € / Schicht
Wartungskosten	2.000 € / a

Kostenpunkte Mitarbeiter Montage

Einstellungsprozess + Anlernen	10.000 €
Lohnkosten inkl. Lohnnebenkosten im ersten Jahr	40 € / h (+1€ / h Steigerung pro Jahr)

Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Anzahl an zu montierenden Getrieben je Schicht	540
Anzahl Schichten	1
Arbeitszeit pro Schicht	7,5 h
Montagezeit he Bauteil Roboter	12 s

Ergebnis Simulation

Arbeitszeit je Getriebe (Roboter)	FTE: 0,37 135 s
Referenz: Arbeitszeit je Getriebe Mensch	50 s
Auslastung Roboter	100 % (davon 93 % Arbeitszeit)
Weitere Erkenntnisse	Unitree G1 ist zu klein für den Arbeitsplatz. Roboter muss in der Nacht arbeiten, um die Anzahl an Produkten auszugleichen.

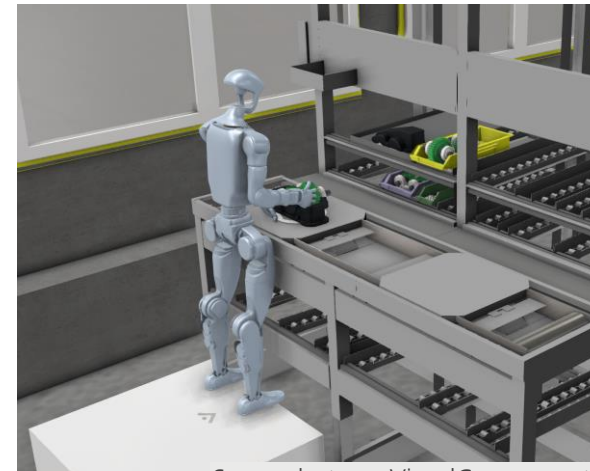
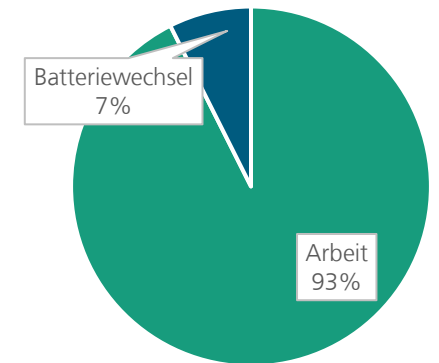
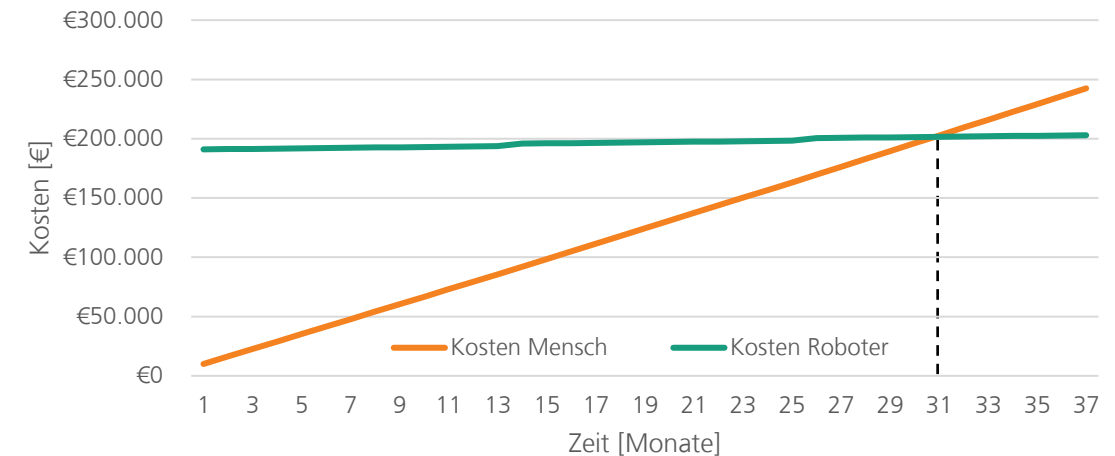


Abb.: Erhöhung des Roboters durch ein Podest, um auf der Arbeitsfläche arbeiten zu können

Auslastung Roboter pro Tag



Amortisationszeit »Montage«



Die Amortisationszeit liegt bei dieser Anwendung bei ca. 2,6 Jahren.*
Wirtschaftlich betrachtet kann der Roboter für diese Anwendung genutzt werden.
Jedoch muss die Prozesssicherheit und Betriebssicherheit ebenfalls betrachtet werden!

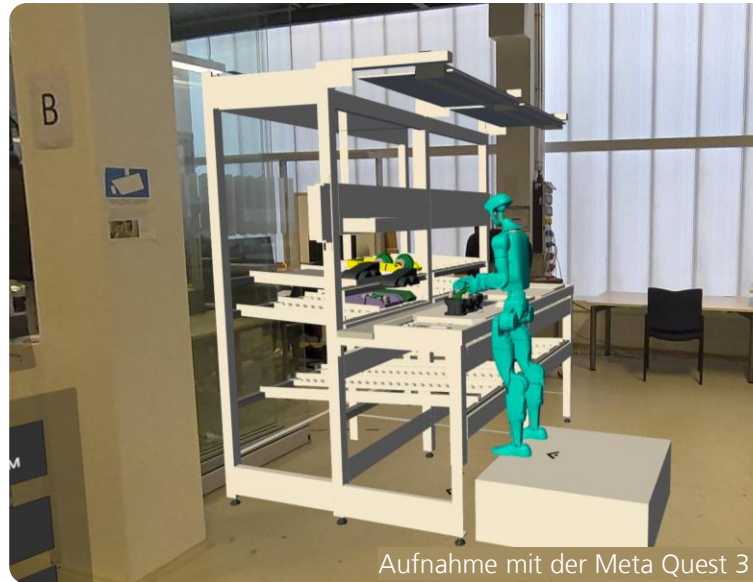
*: Amortisationszeit basierend auf der Simulation und der Annahme, dass der erforderliche Technologiereifegrad besteht und die Lösung in Kleinserie eingesetzt wird.

5.3 Anwendungsbeispiele: vorab Validierung der Montage



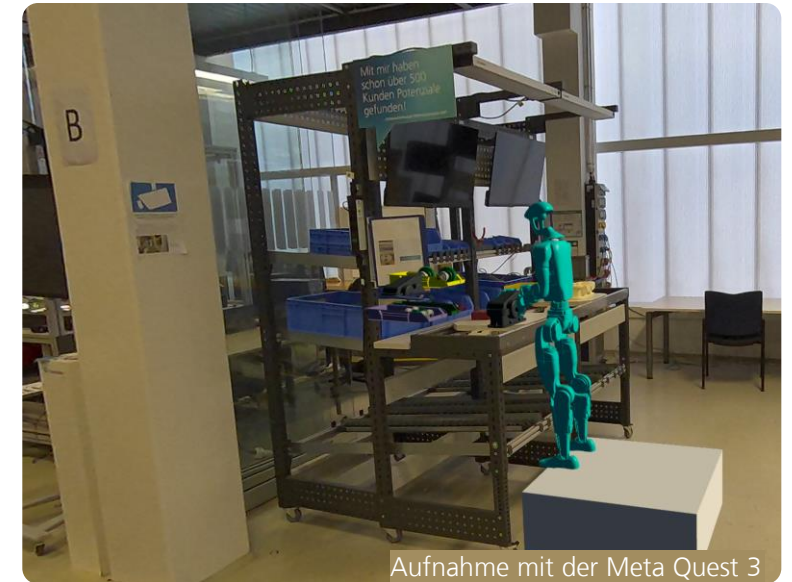
Aufnahme mit der Meta Quest 3

Potenzieller Raum für die
Arbeitsstation



Aufnahme mit der Meta Quest 3

Eine virtuelle Begehung im Vorfeld
einer möglichen Umsetzung



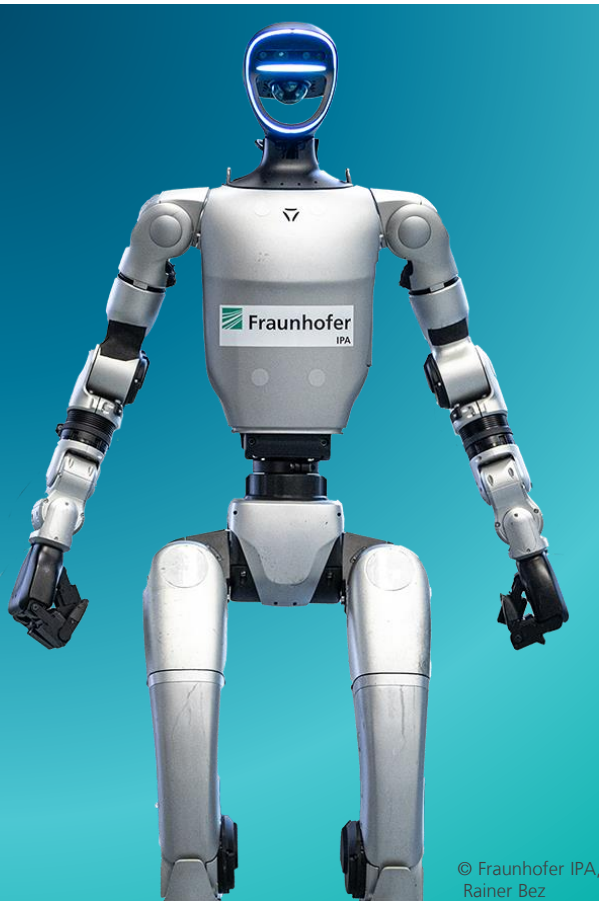
Aufnahme mit der Meta Quest 3

Der reale Arbeitsplatz mit virtuellem
Humanoiden Roboter

Simulation trifft Realität

Durch Extended Reality wird das digitale Roboterszenario maßstabsgetreu in die reale Umgebung eingeblendet und vor Ort begehbar. Somit lassen sich mögliche Kollisionen, Zugänglichkeiten und Reichweiten unmittelbar erkennen. Damit kann nicht nur eine Umsetzbarkeit eines neuen Arbeitsplatzes geprüft werden, sondern es unterstützt auch eine Entscheidung für den Einsatz an einem bereits bestehenden Arbeitsplatz.

6 Zusammenfassung



© Fraunhofer IPA,
Rainer Bez

1

Die Wirtschaftlichkeit einer Anwendung mit Humanoiden ist neben der technischen Machbarkeit und der Sicherheit eine unabdingbare Grundlage für deren Einsatz in der Produktion und Logistik. Empfehlenswert ist eine Betrachtung von Lösungsalternativen mit bestehenden Erfahrungswerten (z.B. FTS + Manipulator) im Vergleich zu Humanoiden Robotern.

2

Die Integration und das Training der Roboter für eine spezifische Aufgabe darf nicht vernachlässigt werden. Zum aktuellen Zeitpunkt existieren keine vergleichbare Standardlösungen, wodurch der Aufwand dafür nur grob dimensioniert werden kann.

3

Zusätzlich ist die Auslastung der Humanoiden Roboter ein kritischer Faktor. Empfehlenswert ist der Einsatz eines solchen Roboters bei Aufgaben, dessen Pausen, sofern vorhanden, für weitere, zeitunkritische Aufgaben genutzt werden können.

4

Eine virtuelle Begehung vorab und vor Ort kann Risiken, Zugänglichkeiten und Reichweiten veranschaulichen und somit den Entscheidungsprozess für den Einsatz von Humanoiden Robotern unterstützen.

Kontakt

Katharina Barbu, M.Sc.

Tel. +49 711 970-1339

katharina.barbu@ipa.fraunhofer.de

Joshua Beck, M.Sc.

Tel. +49 711 970-1851

joshua.beck@ipa.fraunhofer.de

**Forschungsteam Automatisierungsplanung
Forschungsbereich Automatisierung und Robotik**

Fraunhofer IPA

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

www.ipa.fraunhofer.de/robotsafety



Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA

Gefördert
durch



Baden-Württemberg
Ministerium für Wirtschaft,
Arbeit und Tourismus



© Fraunhofer IPA, Rainer Beitz

Dieser Leitfaden dient als Übersicht über den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Sicherheit humanoider Roboter im September 2025 und ersetzt nicht die eigene Risikobeurteilung und sorgfältige Anwendung von Normen.