

EFFIROB

EINE ANALYSE DER FRAUNHOFER-INSTITUTE IPA UND ISI IM AUFTRAG DES BMBF

Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik- Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung



EFFIROB

EINE ANALYSE DER FRAUNHOFER-INSTITUTE IPA UND ISI IM AUFTRAG DES BMBF

Diese Analyse wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Kennzeichen 01IM09001) zwischen dem 1. Dezember 2009 und dem 30. November 2010 durch die Fraunhofer-Institute IPA (Stuttgart) und ISI (Karlsruhe) erstellt.

Das BMBF war an der Abfassung der Aufgabenstellung und der wesentlichen Randbedingungen beteiligt. Die Studie wurde durch den Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Projektträger PT-SW betreut. Die Autoren bedanken sich für die hervorragende Zusammenarbeit.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Haftung

Die in dieser Studie enthaltenen Angaben stellen die jeweils aktuelle Meinung der Autoren dar. Sämtliche Informationen beruhen auf öffentlich zugänglichen Quellen und circa 50 Expertengesprächen, die sorgfältig ausgewählt und als zuverlässig erachtet wurden. Eine Garantie für die Vollständigkeit und Richtigkeit der gemachten Angaben kann nicht übernommen werden. Alle zitierten Internet-Seiten waren zum Zeitpunkt der Endredaktion am 24. Februar 2011 verfügbar.

DIE URHEBERRECHTE DIESER STUDIE LIEGEN BEI DER
FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Studie liegt bei den Autoren, stellvertretend:

Martin Hägele
Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
www.ipa.fraunhofer.de
Nobelstraße 12
D-70569 Stuttgart, Germany
Tel: +49 711 970 1203,
Fax: +49 711 970 1008

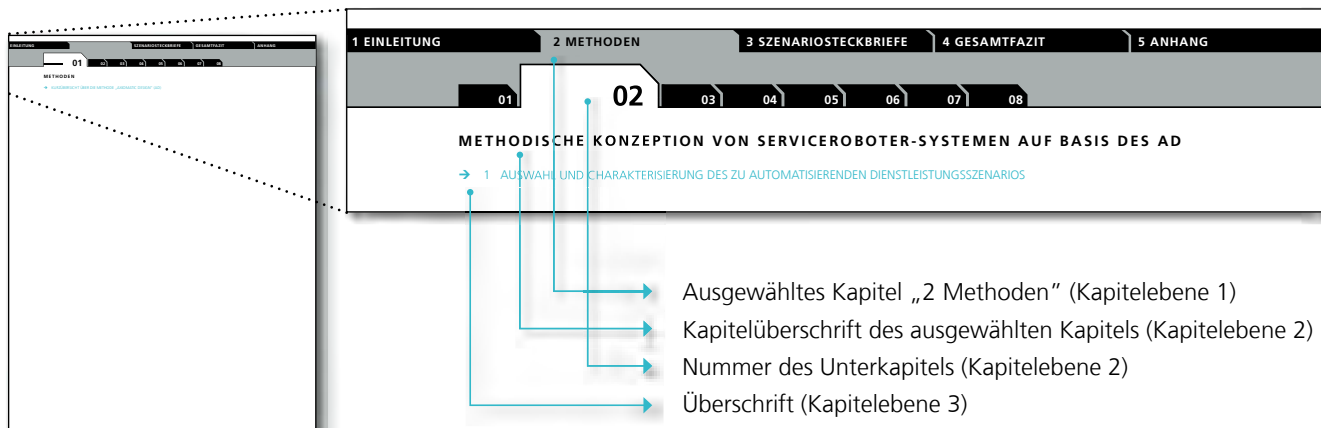
Die Autoren freuen sich über ein Feed-back zur Studie unter der E-Mail-Adresse:
Martin.Haegel@ipa.fraunhofer.de

Gestaltung:
REFORM DESIGN
Industriestraße 25
70565 Stuttgart
www.reform-design.de

Copyright © by
Fraunhofer-Gesellschaft
Hansastraße 27c
80686 München

NUTZUNG DES DOKUMENTS

Aufbau



Weitere Unterteilungen (niedrigere Kapitelebenen) sind durch Überschriften im Text als einfache Überschrift markiert.











Gliederung der Szenariensteckbriefe in 6 Kapitel:

Die Gliederung ist durch Icons auf der rechten Seite gekennzeichnet und dienen gleichzeitig der Navigation durch den jeweiligen Steckbrief.



NUTZUNG DES DOKUMENTS



Navigation

- von einer Seite zu nächsten (vorwärts/rückwärts):
 - Pfeiltasten auf der Tastatur    
 - Scrollen mithilfe der Maus
- zu einem Kapitel springen
 - nutzen Sie die Navigationsreiter im oberen Drittel
 - nutzen Sie die Navigation im Navigationsfenster „Inhalt“ des Acrobat Reader
 - nutzen Sie die Lesezeichen im Acrobat Reader
 - nutzen Sie das Inhaltsverzeichnis auf Seite 5
- Vergrößern, Verkleinern
 - mit der Lupe 
 - Tastenkürzel:   und 
- Vollbild / Präsentationsmodus  

Verknüpfungen

- Links innerhalb der Texte sind kursiv und unterstrichen
- externe Links sind ebenfalls kursiv und unterstrichen sowie zusätzlich blau hervorgehoben

Suche

- Seite: in der Navigationsleiste des Acrobat Reader
- Worte: Tastenkürzel  

Fußnoten

Werden durchgezählt für:

- die Kapitel 1 und 2 (Einleitung, Methoden)
- die einzelnen Steckbriefe in Kapitel 3
- die Kapitel 4 und 5 (Gesamtfazit)

INHALTSVERZEICHNIS

Inhalt

Nutzung des Dokuments	3	2.8.2 Struktur eines Szenariosteckbriefes	62
Inhaltsverzeichnis	5		
Executive Summary	7		
1 Einleitung	9	3 Szenariensteckbriefe	65
1.1 Situation des Zukunftsmarktes „Serviceroboter“	9	3.1 Außenanlagenwartung	66
1.2 Zielsetzung	13	3.2 Bereitstellen von Pflegeutensilien	86
1.3 Vorgehensweise	14	3.3 Bewegen von Personen in der Pflege	113
1.4 Auswahl möglicher Einsatzgebiete und Festlegung von Szenarien in Zielmärkten	16	3.4 Bodenfrüchteernte	139
		3.5 Bodenreinigung	164
		3.6 Containertransport im Krankenhaus	188
		3.7 Fassadenreinigung	212
		3.8 Innenausbauassistenz	233
2 Methoden	17	3.9 Kanalinspektion	256
2.1 Kurzübersicht über die Methode "Axiomatic Design" (AD)	19	3.10 Milchviehwirtschaft	276
2.1.1 Zig-Zagging	20	3.11 Produktionsassistenz	296
2.2. Methodische Konzeption von Serviceroboter-Systemen auf Basis des AD	23		
2.2.1 Auswahl und Charakterisierung des zu automatisieren- den Dienstleistungsszenarios	23	4 Gesamtfazit szenarioübergreifende Zusammenfassung und Implikationen	319
2.2.2 Funktionale Analyse des Ausgangsszenarios	25	4.1 Betriebswirtschaftliche Perspektive	320
2.2.3 Konzeption des Serviceroboter-Systems	32	4.1.1 Übersicht zu den Marktpotenzialen	320
2.2.4 Strategien der Variantenbildung	37	4.1.2 Zusammenfassende Beurteilung der Marktpotenzialanalyse	327
2.3 Schätzung von Kosten und Reifegraden der Systemkomponenten	38	4.2 Technische Perspektive	329
2.3.1 Technology Readiness Level	38	4.2.1 Sicherheit	329
2.4 Erhebung der Life Cycle Costs durch Informations- gespräche und Vorortaufnahmen	45	4.2.2 Mechatronische Schlüsselkomponenten	333
2.4.1 Interviews	45	4.2.3 Software-Kosten	337
2.5 Marktstrukturanalyse		4.2.4 Zusammenfassende Beurteilung der verwendeten Komponenten und Technologien	338
2.5.1 Marktpotenziale: Life Cycle Costing, LCC-Tool und Marktstrukturanalyse	46	4.3 Forschungsbedarfe	340
2.5.2 Life Cycle Costing: Methodische Hintergründe	48	4.3.1 Vorrangige Schlüsselfunktionen der betrachteten Serviceroboter-Anwendungen	341
2.5.3 Methodik	50	4.3.2 Abhängigkeiten innerhalb der Servicerobotik- Schlüsselkomponenten	342
2.5.4 Das „SR-LCC-Tool“	53	4.3.3 Forschungsbedarf für betrachtete Serviceroboter- Schlüsseltechnologien	346
2.6 Marktstruktur- und Potenzialanalyse	56	4.3.4 Forschungsbedarf in Bezug auf ein effizientes Systems Engineering für Serviceroboter-Anwendungen	351
2.7 Abschätzung Skalenökonomischer Effekte	58	4.3.5 Zusammenfassende Beurteilung der Forschungsbedarfe	353
2.8 Szenariobearbeitung	60		
2.8.1 Zusammenfassung der Methoden und ihre Anwendung in den Steckbriefen	61		

INHALTSVERZEICHNIS

5	Anhang	355
5.1	Kinematik-Katalog	355
5.2	Komponentenkatalog	356
5.3	Software-Kostenbewertungstabelle.....	359
5.4	EFFIROB Glossar.....	361
5.5	Ausgewählte, wichtige Abkürzungen.....	365
5.6	Gesprächsleitfaden	366
5.7	Über die Autoren	368

EXECUTIVE SUMMARY

Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) haben die Fraunhofer-Institute für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und für System- und Innovationsforschung ISI im Zeitraum vom Dezember 2009 bis November 2010 neuartige Servicerobotik-Anwendungen entwickelt und deren Bedeutung für die Robotikentwicklung aus einer technischen wie wirtschaftlichen Perspektive heraus analysiert. Ziel war es dabei, bewusst über eine rein konzeptionelle Betrachtung hinauszugehen und insbesondere die technische und die wirtschaftliche Machbarkeit der Servicerobotik-Anwendungen anhand von konkreten Szenarien aufzuzeigen bzw. zu analysieren. Weiterhin sollten aus der Gesamtbetrachtung der Serviceroboter-Szenarien Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur Verbesserung von Kosten-Nutzen-Relationen bzgl. Schlüsseltechnologien, Komponenten und Systementwicklungsprozessen abgeleitet werden.

Zu diesem Zweck wurde ein umfangreicher Methodensatz samt dazugehörigen Softwaretools entwickelt, die Entwicklern und Anwendern mit technischem Grundverständnis eine kalkulatorische Entscheidungshilfe ihres Engagements in Anwendungsbereichen der Servicerobotik zur Verfügung stellen. Der Kern der Methoden basiert auf praktischen, ingenieurwissenschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Methoden – insbesondere dem Axiomatic Design (AD) sowie der lebenszyklusorientierten Kostenanalyse (LCC), welche gewährleisten, dass die Bedürfnisse der Anwender und die technologische Machbarkeit vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit in adäquater Weise zusammengeführt werden.

Exemplarisch untersucht wurden 11 neuartige Anwendungen von Servicerobotern, sog. Serviceroboter-Szenarien:

- Außenanlagenwartung
- Bereitstellen von Pflegeutensilien
- Bewegen von Personen in der Pflege
- Bodenfrüchteernte
- Bodenreinigung
- Containertransport im Krankenhaus
- Fassadenreinigung

- Innenausbauassistentz
- Kanalinspektion
- Milchviehhaltung
- Produktionsassistentz

Die in dieser Studie entwickelten Serviceroboter-Konzepte unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander – und zwar nicht nur hinsichtlich der ihnen zugrunde liegenden technischen Ausführung, sondern auch und insbesondere hinsichtlich ihrer betriebswirtschaftlichen Bewertung. Dementsprechend lassen sich folgende Kernbotschaften aus diesen beiden Perspektiven zusammenfassen:

Aus technischer Sicht wurden Forschungsbedarfe für die Servicerobotik gehäuft in den Bereichen Wahrnehmung, Navigation und Manipulation identifiziert, meist im Zusammenhang mit bislang unbefriedigend gelösten Software-Problemen. Hardwareseitig fehlt im Wesentlichen nicht die Technik (Invention) in Form von Schlüsselkomponenten, sondern deren kostengünstige Verfügbarkeit (Innovation). Demnach erscheinen mit heutigen Technologien die meisten Anwendungen technisch, aber nicht unbedingt wirtschaftlich machbar. Die sich daraus ergebenden Postulate für zukünftige Forschungsbedarfe sind im Einzelnen:

- Die Wahrnehmung ist erwartungsgemäß zentrale und wichtigste Funktion in der gewerblichen Servicerobotik, die mit anderen Technologien in Abhängigkeit steht. Da Verbesserungen in der Wahrnehmung vielverzweigte Auswirkungen in weitere Schlüsseltechnologien der Robotik haben (z.B. Navigation, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion), sollten Forschungsanstrengungen in die Richtung gelenkt werden, zukünftig schneller, zuverlässiger und in größerer Anzahl Objekte und Situationen unter Alltagsbedingungen erfassen zu können.
- Um die Navigation von autonom mobilen Servicerobotern zu verbessern, sollte die Robustheit von Bahnplanung und Selbstlokalisierung erhöht werden, um die Anfälligkeit gegenüber dynamischen Störgrößen, wie sie im Betriebsalltag vorzufinden sind (z.B. wechselnde Lichtverhältnisse,

EXECUTIVE SUMMARY

Witterung) zu senken. Insbesondere Ausrüster mobiler Robotersysteme fordern zur weiteren Anwendungserweiterung Navigationsverfahren mit Verfügbarkeiten nahe 100% unter Alltagsbedingungen wie z.B. in öffentlichen Umgebungen, Hallen und Gebäudefluren.

- Die Fähigkeit zur physischen Interaktion mit Objekten (Manipulation) ist eine Schlüsseltechnologie für die Erschließung neuer Anwendungsfelder in der Servicerobotik. Das Greifen von Objekten ist dabei eine häufig vorkommende (Teil-)Aufgabe, daher sollten Verbesserungen in Greifgeschwindigkeit und Griffvariabilität (Anzahl der verschiedenen greifbaren Objektformen) angestrebt werden.
- Bei Fehlverhalten oder Ausfall eines Serviceroboters muss der Mensch eine unkomplizierte Möglichkeit haben, den Roboter wieder zur gewünschten Funktionsweise überführen zu können, um die Akzeptanz der Robotiklösung sicherzustellen. Ein vielversprechender, die Robustheit der Anwendung steigernder Ansatz ist die sog. „Shared Autonomy“, womit durch kurzzeitige Teleoperation (z.B. durch online-Arbeitsplätze) oder durch ad-hoc Instruktion am Roboter vor Ort (z.B. durch Smart Phones) gezielt Informationen und Aktionen bereitgestellt werden.
- Die Sicherheit der Personen innerhalb des Arbeitsbereichs ist unabdingbare Voraussetzung für den Einsatz von Servicerobotern. Das aktuelle ISO-Normenwerk bietet bereits eine gute Grundlage für deren Realisierung. Aufgrund ihrer vielseitigen Einsetzbarkeit bei der Arbeitsraumüberwachung von Serviceroboter-Systemen sollte daher sicherheitsgerechte Sensorik zur 3D-Überwachung- und Annäherungserkennung.
- Bezüglich der Hardware (typischer Roboterkomponenten wie Arm, Greifer, mobile Plattform, Sensoren, etc.) lässt sich feststellen, dass zwar bereits ausreichend Funktionalität für vielzählige Anwendungen vorhanden ist, jedoch bei z.T. hohen Kosten und gleichzeitig tendenziell eingeschränkter Zuverlässigkeit aufgrund der noch jungen technischen Reifegrade. Hardware-bezogene Forschung sollte daher auf eine Verbesserung dieser Situation fokussieren.
- Die Entwicklung von Software verursacht signifikante Kosten

bei den Herstellern und Integratoren von Servicerobotern. Vielfach übersteigen Umfang und Risiko der für typische Serviceroboter-Systeme benötigten Software die Erfahrung und die Ressourcen der potenziellen Ausrüster. Dem ließe sich entgegenwirken, indem öffentliche Repositories mit standardisierten und wiederverwendbaren Komponenten zur Verfügung gestellt und gefördert werden, um durch kooperatives Software-Engineering Kosten und Risiko zu reduzieren.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht lassen sich diese Kernbotschaften auf Grundlage der durchgeführten Analysen zur Abschätzung und Beurteilung der Marktpotenziale (für Deutschland) generell noch um Folgende ergänzen – insbesondere bzgl. solcher Serviceroboter-Konzepte, für die aufgrund der betriebswirtschaftlichen Bewertung mit keiner nennenswerten Ausnutzung des Marktpotenzials gerechnet werden kann:

- Die Reduzierung der Anschaffungskosten ist in der Regel nicht der primäre Hebel zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit eines Serviceroboter-Konzepts – die häufig in diesem Zusammenhang angeführten Skaleneffekte zur Behebung der Wirtschaftlichkeitsdefizite sind in den untersuchten Anwendungen von nachrangiger Relevanz im Vergleich zu einer Reduktion der Betriebs- und/oder Wartungskosten.
- Weiterhin kann eine Entscheidungsrelevanz qualitativer Zusatznutzen bei deutlich negativer Wirtschaftlichkeitsrelation in keinem der betrachteten Zielmärkte festgestellt werden. Folglich können qualitative Faktoren eine schlechte Wirtschaftlichkeitsrelation in der Regel nicht kippen.
- Schließlich gilt es zu beachten, dass eine gute Wirtschaftlichkeit eines Serviceroboter-Konzepts nicht mit einer hohen Ausnutzung der ausgewiesenen Marktpotenziale gleichgesetzt werden darf. In einigen Märkten scheinen insbesondere fehlende Finanzierungsmöglichkeiten ein wesentlicher Engpass zu sein – trotz positiver Wirtschaftlichkeitsrelation. Hier könnten ggf. neue Geschäftsmodelle auf Seiten der Anbieter, die diesen Engpass adressieren (wie z.B. Betreiber-Modelle), einen Ausweg bieten.

SITUATION DES ZUKUNFTMARKTES „SERVICEROBOTER“

Der Dienstleistungssektor weist weltweit seit Jahren im Vergleich zu den anderen Wirtschaftssektoren ein überproportionales Wachstum auf. So stieg beispielsweise in der Bundesrepublik Deutschland der Anteil der Beschäftigten im Dienstleistungssektor zur Gesamtzahl der Erwerbstätigen zwischen 1970 und 2009 von 43,6% auf über 70%.¹

Nicht nur das steigende Pro-Kopf-Einkommen und das Streben nach mehr Lebensqualität führen zu erhöhter Nachfrage nach Dienstleistungen – in steigendem Maße werden diese zum integralen Bestandteil aller wirtschaftlichen Aktivitäten und stehen zu anderen Wirtschaftsbereichen in komplementärer Beziehung.

Der Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit vor allem erwerbswirtschaftlich orientierter Dienstleistungsanbieter zielt weiterhin auf die Erhöhung der Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit ihrer Dienstleistungen. Während bisher überwiegend moderne Informations- und Kommunikationstechniken zur Ausschöpfung dieser Potenziale eingesetzt wurden, steht dort immer stärker der Bedarf an innovativen Systemen zur Rationalisierung von Handhabungs-, Transport- und Bearbeitungsaufgaben im Vordergrund.

Erste Untersuchungen weisen nach, dass eine teil- oder vollautomatisierte Ausführung von Dienstleistungsaufgaben neben der Wirtschaftlichkeitssteigerung Potenziale bei der menschengerechten Gestaltung von Arbeitsbedingungen, bei der Qualitätssicherung und beim Ausgleich eines Arbeitskräftemangels erschließen hilft. Mit dem Aufkommen der Serviceroboter seit Anfang der 90er Jahre eröffnet sich eine zukunftsweisende Option zur Teil- oder Vollautomatisierung von Dienstleistungen, die überwiegend physische Tätigkeiten oder Bewegungen umfassen. Diese Potenziale, insbesondere aus Sicht des sich abzeichnenden Marktes von Servicerobotern, wurden erstmals 1994 in einer um-

fassenden Potenzialstudie prognostiziert.²

Erste Roboter reinigen schon heute Gebäude, Verkehrswege und Verkehrsmittel. In Industrieanlagen und Museen sorgen Überwachungsroboter für Sicherheit. Ebenso unterstützen teilautomatisierte Systeme Chirurgen bei Eingriffen und das Pflegepersonal bei der Betreuung seiner Patienten. Fahrerlose Transportsysteme übernehmen in Kliniken bereits den Transport von Speisen, Medikamenten und in Verwaltungsgebäuden Botengänge. Immer mehr Roboter bewältigen gefährliche Wartungs- und Inspektionsarbeiten im industriellen Bereich, im Kommunalwesen und in der Energiewirtschaft.

Je nach Grad der kinematischen Beweglichkeit werden diese Systeme in Serviceroboter-Fahrzeuge, manipulierende Serviceroboter oder im allgemeinsten Fall in mobile manipulierende Serviceroboter unterschieden, wobei deren Komplexität und damit auch Entwicklungs-, Fertigungs- und Installationskosten meist von ihrer kinematischen Komplexität (Beweglichkeit und Anzahl der Freiheitsgrade) abhängen.

Aktuell sind über 200 Produktideen, Prototypen und auch Produkte der Servicerobotik für gewerbliche Anwendungen dokumentiert. So breit das Spektrum an Dienstleistungen mit überwiegendem Anteil an repetitiven und physischen Bewegungen (Transport, Handhabung und Führung von Werkzeugen und Arbeitsobjekten) ist, so vielfältig ist die Nutzung von Servicerobotern.

Fast 80 000 derzeit weltweit eingesetzte Serviceroboter-Systeme (SRS) in gewerblichen Anwendungen belegen die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Automatisierung eines weiten Spektrums an Dienstleistungstätigkeiten (Abbildung 1-1.1), wobei mobile Plattformen oder Serviceroboter-Fahrzeuge inzwischen einen anerkannt

¹ Zahlen zur volkswirtschaftlichen Bedeutung des Dienstleistungssektors: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Wirtschaft/dienstleistungswirtschaft,did=239886.html>

² Serviceroboter – Ein Beitrag zur Innovation im Dienstleistungswesen. Teil 1 und Teil 2. Eine Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA). Gefördert vom Bundesministerium für Forschung und Technologie, Förderkennzeichen NT 209, 1994.

SITUATION DES ZUKUNFTMARKTES „SERVICEROBOTER“

hohen technischen Reifegrad erreicht haben. Dennoch ist die Durchdringung des Dienstleistungswesens mit Servicerobotern sowohl hinsichtlich Einsatzbreite als auch Einsatzzahlen schleichend: Erst für das Jahr 2020 bis 2025 wird ein weltweites Marktvolumen prognostiziert, das dem der heutigen Industrieroboter von derzeit über 19 Mrd US\$ (ca. 13,5 Mrd Euro) weltweit entspricht.³ Statistisch ergibt sich für die gewerbliche Servicerobotik folgendes Bild:

- Die Servicerobotik unterteilt sich einerseits in gewerbliche und andererseits in domestische bzw. private Anwendungen. Im Bereich der gewerblichen Anwendungen sind eingesetzte Technologien, Komponenten, Entwicklungsverfahren sowie Produktion und Vertrieb mit denen neuartiger Industrieroboter für die Produktion (z.B. Assistenz-Roboter) vergleichbar.

- Die Einsatzzahlen von Servicerobotern sowohl in den gewerblichen als auch domestischen bzw. privaten Anwendungen sind steigend (im Schnitt über 20% pro Jahr seit 2003).
- Serviceroboter in gewerblichen Anwendungen sind Spezialisten mit kleinen Stückzahlen (max. wenige Tausend) in stark unterschiedlichen Zielmärkten – von der Landwirtschaft bis zum Gesundheitswesen.
- Die Ausrüsterstruktur ist heterogen: Industrieroboter-Hersteller vertreiben Lösungen für die Chirurgie und Therapie, Maschinenbauern nutzen Robotertechnologien zur Steigerung des Automatisierungsgrads ihrer Produkte (gesteuerte Betonverteilermasten, Reinigungsroboter, Melkroboter, Kanalinspektionsroboter, etc.).

Einsatzzahlen Serviceroboter weltweit

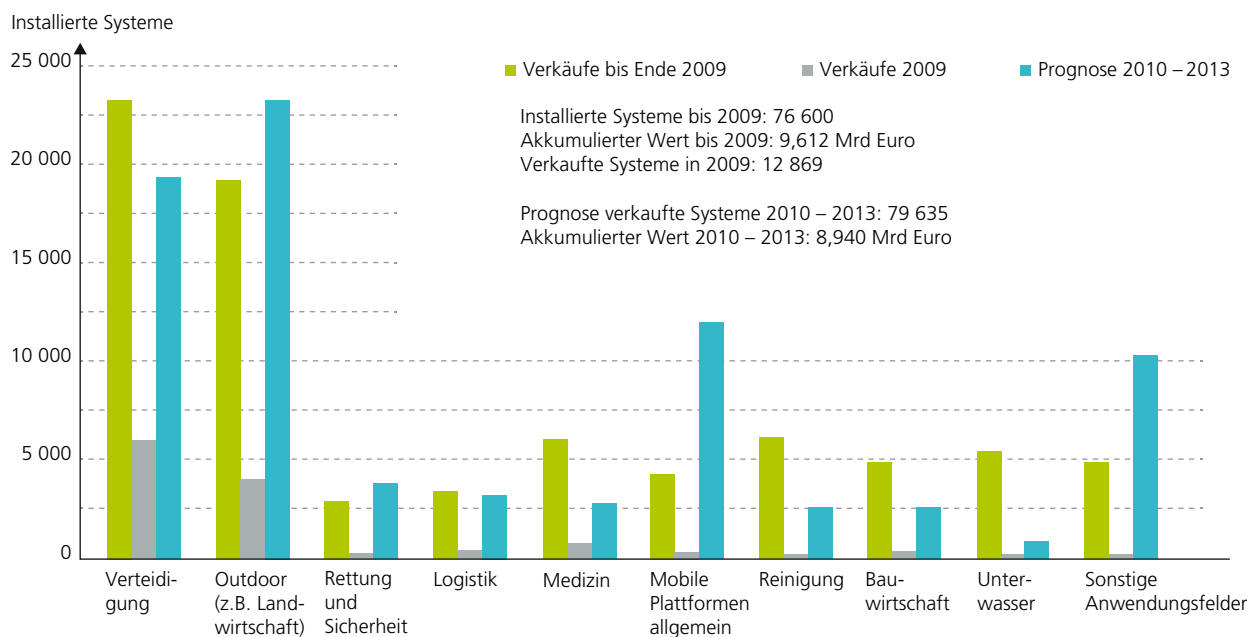


Abb. 1-1.1 Einsatzzahlen und Zuwächse 2009 sowie Prognosen weltweit zur gewerblichen Servicerobotik (Quelle: IFR Statistical Department und Fraunhofer IPA)

³ International Federation of Robotics (IFR): World Robotics 2010 Service Robots. Statistics, Market Analysis, Forecasts and Case Studies. September 2010; <http://www.worldrobotics.org/index.php>. Aktualisierte Zahlen für 2010 werden auf dieser Website ab Oktober 2011 veröffentlicht.

SITUATION DES ZUKUNFTMARKTES „SERVICEROBOTER“

- Start-up-Unternehmen treten mit neuartigen Produkten für Nischenanwendungen auf, wie z.B. Roboter-Studio-Kameras oder Baumarkt-Auskunftssysteme. Selbst kleine Start-ups vertreiben europa-, wenn nicht gar weltweit, um das Absatzvolumen ihrer Produkte und Dienstleistungen in den aktuellen Nischenmärkten zu maximieren.
- Der Markt der Roboter für domestische, private Anwendungen beschränkt sich aktuell weitgehend auf Roboter-Sauger, -Mäher und -Spielzeuge.³ Kaufanreize werden im Wesentlichen durch Faszination und Neugier geschaffen.

In der Summe blieb bislang das Wachstumspotenzial der Servicerobotik aber hinter den Prognosen zurück. Folgende Diffusionshemmnisse stellen insbesondere für manipulierende Serviceroboter die wesentlichen Faktoren der bislang nur langsamen Verbreitung dar:⁴

- **Technische Anforderungen.** Zahlreiche, in Servicerobotern einsetzbare Komponenten leiten sich aus der Industrieroboter-Technik ab. Dennoch ergeben sich in wesentlichen funktionalen Anforderungen bzw. zu erreichenden Leistungsdaten deutliche Erweiterungen, insbesondere in Bezug auf Sensorik (Wahrnehmung) und kinematische Beweglichkeit, die nicht immer von derzeit marktgängigen Produkten zu den geforderten Kosten abgedeckt werden.
- **Hohe Entwicklungs- und Systemkosten.** Günstige Marktpotenziale erwachsen aus der großen Bandbreite möglicher Einsatzfälle, doch sind Serviceroboter auf die jeweilige Dienstleistungsaufgabe abgestimmte Spezialisten. Sie werden, anders als im Bereich konventioneller Industrieroboter, individuell an Art, Umfeld und Ablauf einer Aufgabe angepasst. Meist ergeben sich nur geringe Möglichkeiten zur Präparierung oder automatisierungsgerechten Modifizierung von Einsatzumgebungen, so dass der Einsatz von Sensoren zur Identifikation und Lokalisierung

von Objekten, Personen und Hindernissen als zusätzlicher Kosten- und Entwicklungsfaktor zu Buche schlägt. Standardisierte Systemarchitekturen eröffnen Zulieferern von Schlüsselkomponenten neue Märkte. Hierdurch lassen sich kostenmindernde "Economies of Scale" (EoS)-Effekte für die Servicerobotik erzielen.

- **Flexibilität.** Anwendungen der Servicerobotik fehlt es an Voraussetzungen – wie etwa eines Baukastenprinzips oder einer „plug & play“-Peripherie – für flexible Konfigurationsoptionen und die Fähigkeit, Technologieträger oder -Plattformen für mehrere Aufgaben umzubauen und einzusetzen. Der besonders in kleinen Organisationen relevante Kostenvorteil eines Roboters, dauerhaft in Betrieb zu sein, lässt sich mangels Flexibilität oft nicht nutzen.
- **Sicherheit.** In zahlreichen Fällen wird die Aufgabenausführung durch einen Serviceroboter in öffentlichen Bereichen erfolgen. Der in vielen Fällen nicht vermeidbare und für manche Anwendungen notwendige Kontakt mit Personen stellt dabei erhöhte Anforderungen an die Sicherheitstechnik und begrenzt die Gestaltungsspielräume bei der Planung und Entwicklung.
- **Akzeptanz.** Letztlich entscheidet der Anwender über den Nutzen eines Serviceroboters als Relation von Nutzwert und Kosten. Für neue Märkte sind Produkte bzw. Serviceroboter-Anwendungen zu finden und umzusetzen, die im Alltag durch ihren Gebrauchsnutzen überzeugen und Wirtschaftlichkeitsforderungen gerecht werden.

⁴ Teilnahmewettbewerb zur Ausschreibung „Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Robotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung“; öffentliche Bekanntmachung eines Dienstleistungsauftrags vom 16. Juli 2009. <http://ted.europa.eu/udl?uri=TED:NOTICE:196481-2009:TEXT:DE:HTML>

SITUATION DES ZUKUNFTMARKTES „SERVICEROBOTER“

Zahlreiche Initiativen zur Überwindung dieser Hemmnisse zielten bislang auf eine Betonung des Technologie-Pushs ab: Durch Roadmapping sollten für die Servicerobotik relevante Technologien strukturiert, bewertet und priorisiert sowie Serviceroboter-Anwendungen mit Durchschlags- oder Pioniercharakter („Killer-Applications“) identifiziert werden.^{5, 6, 7, 8} Dagegen blieben systematische Analysen der Bedarfslagen potenzialträchtiger Nutzergruppen und eine Ableitung der daraus erwachsenden Anforderungen im Sinne eines Anwendungs-Pull bisher aus.

Die Motivation zur Durchführung dieser Studie fußt auf den Annahmen:⁴

- „Autonome, mobile Roboter für Produktion, Logistik und Dienstleistung sind nach Aussagen der EU-Kommission für die Wettbewerbsfähigkeit Europas von „strategischer Bedeutung bei der Fertigung in der Hochlohnregion Europa und zum Ausgleich des Rückgangs der erwerbstätigen Bevölkerung“.
- Die klassische Industrierobotik ist ökonomisch nur noch begrenzt entwicklungsfähig und andere, technisch anspruchsvolle Anwendungsfelder und neue Märkte müssen erschlossen werden.
- Die bisher von neuen Anbietern auf den Markt gebrachten „Serviceroboter“ – wie autonome Rasenmäher oder Staubsauger – sind zwar technisch anspruchslose Geräte mit begrenztem Nutzwert, aber erreichen relativ hohe Stückzahlen. Der hohe Absatz von flexiblen Spielrobotern weist auf grundsätzlich hohes Interesse und Akzeptanz für innovative Robotersysteme hin.“

Die in dieser Studie betrachtete Servicerobotik wird laut Ausschreibung gegenüber der gängigen Definition durch folgende charakteristische Eigenschaften erweitert:⁹

- autonome Mobilität,
- in einer gekennzeichneten, ggf. präparierten Umwelt (funktionsteilend) agierend,
- mit dem Menschen kooperierend und
- ggf. mit einem Manipulatorarm ausgerüstet.
- Weitere Eigenschaften können anwendungsspezifisch wichtig sein und sind aus der Zielgruppensicht abzuleiten.

In dieser Studie soll ein Perspektivenwechsel vollzogen werden: von der bisher dominanten technologiegeprägten Sichtweise (Technologie-Push) zu einer verstärkten Betrachtung der Nachfrageseite des Marktes (Anwendungs-Pull) seitens der Servicerobotik-Ausrüster und -Endanwender.

⁵ *Strategic Research Agenda (SRA) for Robotics*; präsentiert am 7. Juli 2009 in Brüssel; <http://www.robotics-platform.eu/sra>

⁶ *A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics*; präsentiert am 21. Mai 2009, <http://www.us-robotics.us/reports/CCC%20Report.pdf>; eine Kurzform hierzu ist in *World Robotics 2010* (S. 120–140).

⁷ *Roadmap for Developing the Korean Robot Industry*, kommentiert durch Kim Yea-rim: *The Present and Future of Korea's Robot Industry*. In: *Korea IT Times*, <http://www.koreaitimes.com/story/11404/present-and-future-korea%E2%80%99s-robot-industry> 8. November 2010.

⁸ Setoya, H.: *The Japanese Technological Strategy Roadmap in Robot*. In *World Robotics 2009*, S. 118–121; siehe auch <https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/press/EP/inedopress.2010-04-22.3293451624/gaiyou.pdf>

⁹ Gängige Definition der Servicerobotik (IFR) siehe Glossar.



ZIELSETZUNG

Zielsetzung der Studie „Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung“ (EFFIROB) ist es, eine Brücke zwischen den bislang überwiegend technologiegetriebenen Anwendungen und den Nachfragegruppen in unterschiedlichen Märkten zu schlagen. Gemäß den in der Leistungsbeschreibung formulierten Zielen leiten sich für diese Studie folgende Teilziele ab: siehe Abbildung 1-2.1:

- Darstellung von konkreten Serviceroboter-Szenarien aus aktuellen und innovativen Anwendungsfeldern der Robotik, also aus einer Nachfrageperspektive („Anwendungs-Pull“).
- Konzeptentwicklungen der ausgewählten Serviceroboter-Anwendungen und deren umfassende Darstellung in so genannten Steckbriefen.
- Schätzung der Lebenszykluskosten (LCC) des Roboter-Entwurfs und Darstellung der Nutzwerte für den Anwender durch wirtschaftlichkeitsbezogene Kenngrößen, quantitative und qualitative Leistungsmerkmale.
- Ermittlung der Marktgröße für die Serviceroboter-Anwendungen in den neuen Anwendungsfeldern, auf Deutschland bezogen.

- Ausloten von Kosten-Nutzen-Potenzialen bei Robotern durch Skaleneffekte („Economies of Scale“, EoS, z.B. durch Modularität und Gleichteilestrategien).
- Ableitung von Forschungs- und Entwicklungsbedarfen und Handlungsempfehlungen für das BMBF.

Die Studie soll als Nebenergebnis, unterstützt durch eine Excel-basierte Software, kalkulatorische Entscheidungshilfen für neue Anwendungsgebiete der (Service-) Robotik liefern. Diese Entscheidungshilfen zur Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit von neuen Serviceroboter-Anwendungen sollen durch Techniker (anwender- und ausrüsterseitig) anwendbar sein. Detailwissen aus der Robotik soll dabei nicht vorausgesetzt werden.

Zielsetzung der Studie EFFIROB (Effiziente Innovative Servicerobotik)

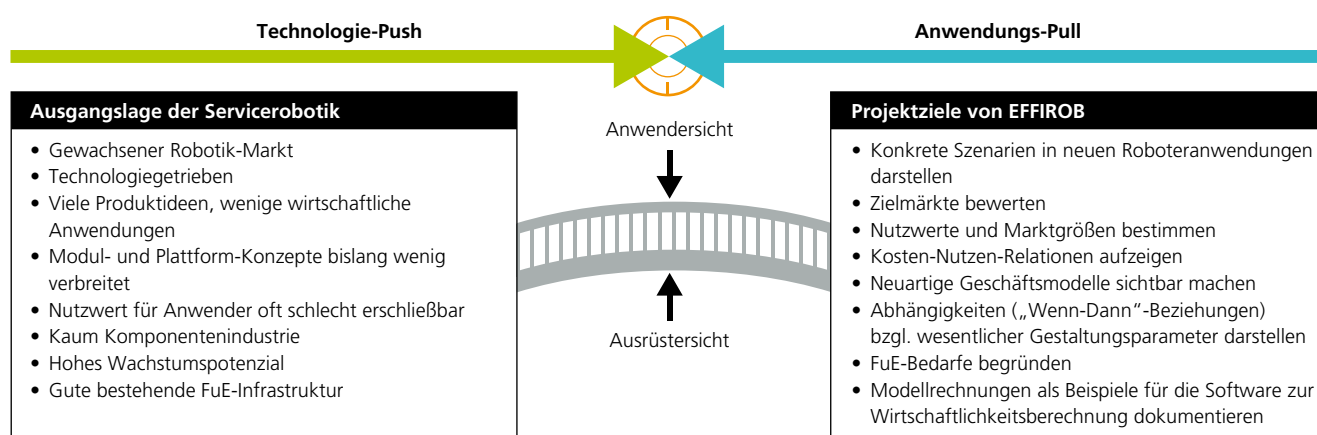


Abb. 1-2.1 Perspektivwechsel in EFFIROB von der technologiegetriebenen Sicht hin zu Bedarfen von Nachfragegruppen künftiger Serviceroboter-Anwendungen



VORGEHENSWEISE

Der grundsätzliche Ablauf der Studiendurchführung und deren Phasengliederung ist in Abbildung 1-3.1 zu sehen:

- Die Auswahl der Zielmärkte fußte auf Basis der „World Robotics“-Kategorisierung, siehe Abbildung 1-1.1, sowie der aktuellen Marktentwicklung bestehender Serviceroboter-Anwendungen.
- Im Rahmen eines Ideenfindungsprozesses auf Basis von Expertengesprächen aus den Zielmärkten (Endanwender und Ausrüster) erfolgten die Sammlung und Vorbewertung bestehender Produktideen als „Ideenpool“ bzw. die Skizzierung neuer Produktideen.
- Aus diesem Ideenpool wurden zunächst 13 Serviceroboter-Anwendungen oder -Szenarien für die weitere Ausarbeitung in Abstimmung mit dem BMBF festgelegt und deren weitere Anforderungen aus Anwendersicht aufgenommen. Um wirtschaftlich aussichtsreiche von bislang eher aussichtslosen Anwendungen zu trennen und Stellschrauben identifizieren zu können, wurden bewusst Szenarien aus beiden Bereichen gewählt, d.h. Szenarien wurden nicht ausschließlich auf Basis einer vorab als positiv eingeschätzten Wirtschaftlichkeit ausgewählt.¹⁰
- Es erfolgte eine systematische Analyse der Ausgangsszenarien einschließlich der Life-Cycle-Cost (LCC)-bestimmenden Kenngrößen und die nachfolgende Konzeption und Bewertung des durch Serviceroboter-Einsatz modifizierten Szenarios. Letztlich wurden 11 Serviceroboter-Anwendungen ausgewählt und in Form von Steckbriefen nach ihrer technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit detailliert.

Nach der Darstellung der Serviceroboter-Anwendungen schließen sich Betrachtungen zu Nutzenoptimierungsstrategien und die Darstellung von Abhängigkeiten („Wenn-Dann-Beziehungen“) an. Basis hierfür ist die Alternativenbildung innerhalb der Szenarien auf der Basis der folgenden Variationsmöglichkeiten:

- Abschätzung von EoS-Effekten durch Skalieren von Produktionsmengen, Nutzung von Gleichteile- und Plattformstrategien.
- Bewertung und Optimierung von Nutzenaspekten durch skalierbare Automatisierungsgrade, Umgebungsstrukturierung bzw. Nutzung einer funktionsteiligen Infrastruktur.
- Bewertung und Optimierung durch alternative Geschäfts- und Betreibermodelle zur Erhöhung des Nutzwerts des Serviceroboter-Einsatzes beim Anwender durch neue Arten der Leistungserbringung und Arbeitsteilung zwischen Anbieter und Anwender, so dass ggf. neue (Teil-) Märkte erschlossen werden können.
- Ableiten von Bedarfen hinsichtlich einer künftigen Forschung und Entwicklung (Technologien, Komponenten, Engineering) sowie Kooperations- und Geschäftsmodellen, Standardisierung und Regelungen.

¹⁰ Folgende Szenarien wurden, nach anfänglich positiver Bewertung in Bezug auf zu erwartende Innovationen und Marktsegmente, durch die Autoren in Folge mehrerer negativer Einschätzungen in Anwendungsgesprächen verworfen: Serviceroboter für die Fertigungslogistik sowie Serviceroboter im Verkehrswegebau (und -wartung). Diese Szenariensteckbriefe und weitere Bewertungen sind nicht Bestandteil der Studiendokumentation. Weitere Informationen geben die Autoren gerne weiter.



VORGEHENSWEISE

Das Dokument ist folgendermaßen aufgebaut:

- Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 die verwendeten Methoden zur Analyse und Konzeption von Serviceroboter-Systemen sowie deren wirtschaftliche Bewertung vorgestellt.
- In Kapitel 3 erfolgt die Darstellung ausgewählter Serviceroboter-Anwendungen in 11 Szenariensteckbriefen auf Basis der in Kapitel 2 dargestellten Methoden.
- Kapitel 4 fasst die Szenarien nach gemeinsamen technischen und wirtschaftlichen Merkmalen zusammen und leitet übergreifende Implikationen für die Weiterentwicklung der Servicerobotik in gewerblichen Anwendungen ab.
- Daraus werden Vorschläge für Forschungsbedarfe in Bezug auf Schlüsseltechnologien und Engineering-Verfahren für marktgerechte Serviceroboter-Systeme abgeleitet.
- Im Anhang (Kapitel 5) finden sich Kataloge zur Unterstützung der Serviceroboter-Konzeption, wie Kinematik-Katalog, Komponenten-Katalog, die Software-Kostenbewertungstabelle, das EFFIROB Glossar, ausgewählte wichtige Abkürzungen sowie die Gesprächsleitfäden für die Expertengespräche und die Vorstellung der Autoren dieser Studie.

Vorgehensweise in EFFIROB

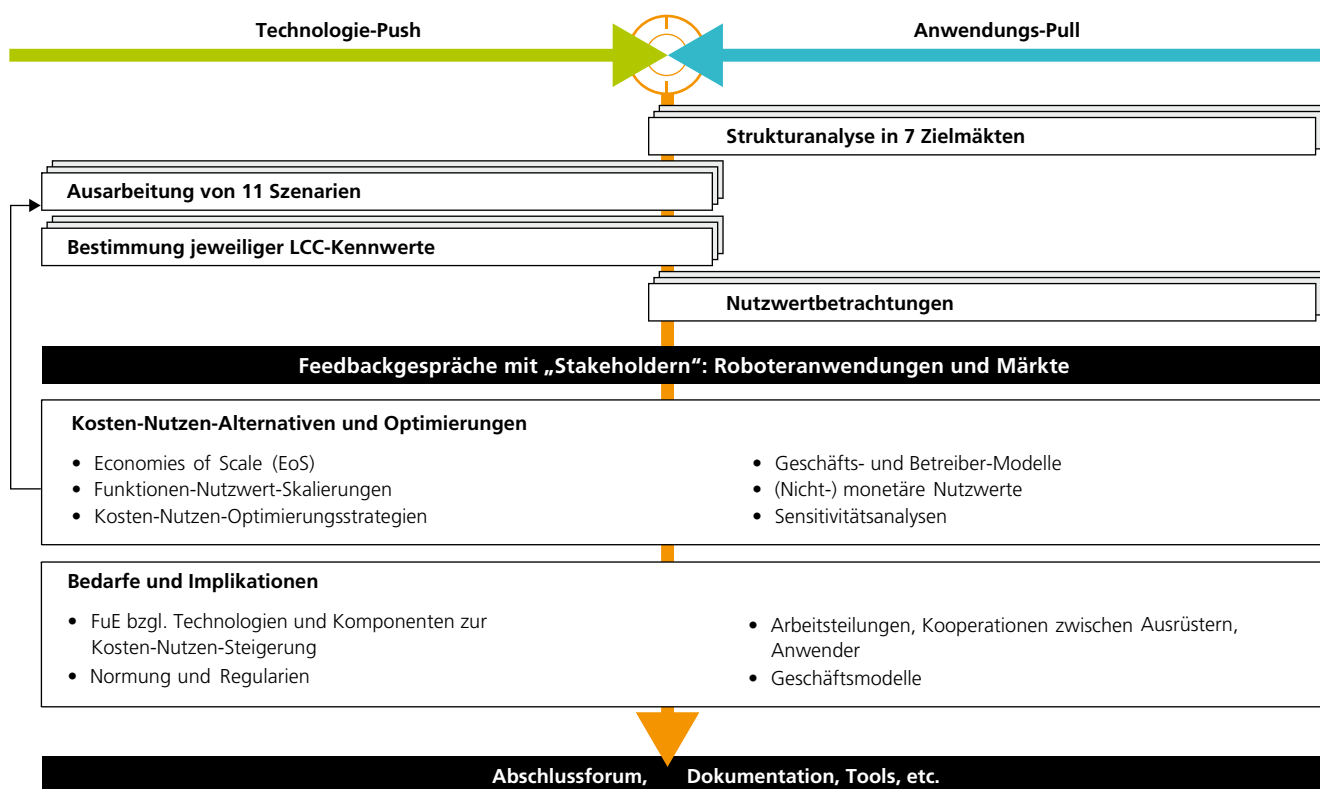


Abb. 1-3.1 Vorgehensweise und methodischer Ansatz im Überblick

AUSWAHL MÖGLICHER EINSATZGEBIETE UND FESTLEGUNG VON SZENARIEN IN DEN ZIELMÄRKTEN

Zentrales Instrument dieser Studie zur Herleitung der Implikationen in Bezug auf Kosten-Nutzen-Relationen, Marktpotenziale und FuE-Bedarfe ist die Ausarbeitung von 11 Serviceroboter-Szenarien in sieben Zielmärkten. Hierbei konkretisiert sich ein Szenario einer Serviceroboter-Anwendung wie folgt:

- Probleme bei und Anforderungen an die Aufgabenausführung aus Nutzersicht sowie Einsatzpotenziale für Servicerobotik,
- Entwicklung eines Systemkonzepts: Aufbau, Aufgabenablauf, Analyse von Funktions- und Leistungsmerkmalen,
- Gegenüberstellung der derzeitigen manuellen oder mechanisierten Lösung mit der antizipierten Serviceroboter-Lösung,
- Marktdaten für das Serviceroboter-Szenario sowie
- Fazit und Empfehlungen.

Es ist nicht Anspruch der Studie, die Gesamtheit aller Anwendungsmöglichkeiten der Servicerobotik aufzuzeigen, vielmehr sollen Technologie- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in ausgewählten Einsatzgebieten als orientierende Beispiele dienen und Leser zu weiteren Serviceroboter-Machbarkeitsstudien motivieren.

Nachdem ein Interview mit einem Experten für das jeweilige Einsatzgebiet geführt wurde, erfolgte die Festlegung der einzelnen Serviceroboter-Anwendungen. Als Experten kamen u.a. in Frage Universitätsprofessoren des entsprechenden Fachbereichs, Vertreter von einschlägigen Dach- und Berufsverbänden oder Spezialisten aus Unternehmen mit langjähriger Branchenerfahrung. Die Auswahl der im Rahmen der Studie betrachteten Serviceroboter-Szenarien ist in Tabelle 1-4.1 aufgezeigt.

Zielmarkt	Betrachtete Anwendung
Landwirtschaft	Bodenfrüchteernte
	Milchviehwirtschaft
Energie- und Wasserversorgung	Außenanlagenwartung
	Kanalinspektion
Logistik	Containertransport im Krankenhaus
Verarbeitendes Gewerbe	Produktionsassistenz
Facility Management	Bodenreinigung
	Fassadenreinigung
Baugewerbe	Innenausbauassistenz
Krankenhäuser / Altenheime	Bereitstellen von Pflegeutensilien
	Bewegen von Personen in der Pflege

Tab. 1-4.1 Ausgewählte Zielmärkte und Anwendungen von Servicerobotern



VERWENDETE METHODEN

Ziel dieser Studie ist u.a. die Bereitstellung eines praktischen Verfahrens zur Konzeption von Serviceroboter-Systemen (SRS) (Kapitel 2.1), zur Bewertung ihrer technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit (Kapitel 2.3 und Kapitel 2.4) sowie zur Abschätzung der Markt- und Absatzpotenziale (Kapitel 2.5 und Kapitel 2.6). Darüber hinaus sollen das Verfahren, in Kombination mit den Steckbriefbeispielen technisch vorgebildete Anwender und Ausrüster motivieren, eigene Serviceroboter-Lösungen systematisch zu konzipieren und zu bewerten.

Verfahren im ingenieurwissenschaftlichen Sinne bestehen aus einer Kombination aus Methoden und Hilfsmitteln.¹¹ Methoden zur systematischen Entwicklung technischer Systeme, d.h. des Systems Engineering (SE), sind planmäßige Vorgehensweisen zur Erreichung festgelegter Ziele und folgen i.A vier grundlegenden Prinzipien,¹² siehe Abb. 2.1:

- Phasengliederung (z.B. Analyse-, Konzept-, Ausarbeitungsphase)
- „Top-Down“: vom Groben zum Detail
- Variantenbildung zum Finden optimierter Lösungen,
- Problemlösungszyklus zur Strukturierung des Entwicklungsprozesses.

Grundstruktur ingenieurwissenschaftlicher Verfahren

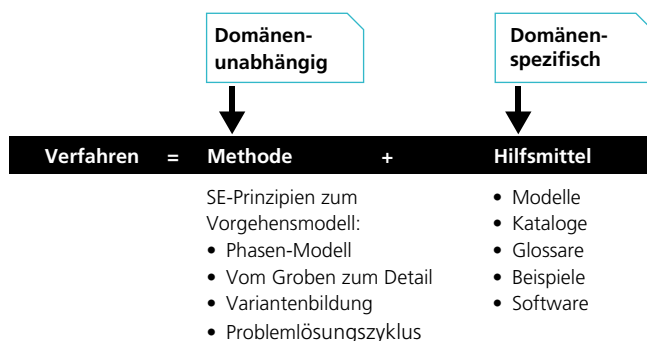


Abb. 2.1 Verfahren als Kombination von Methode und Hilfsmittel

¹¹ Schaaf, W.: Systems Engineering – Ein Überblick. In: Konstruktion 52 (2000), Nr. 6, S. 6ff.

¹² Haberfellner, R. et al.: Systems Engineering. 11. durchges. Auflage. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 2002.

Hilfsmittel geben dem Anwender domänen-spezifische, d.h. sich auf bestimmte Fach- oder Produktgruppen beziehende Informationen und Werkzeuge in die Hand, meist in Form von Modellen, Katalogen und Beispielen. Tabelle 2.1 listet die Anforderungen an das in EFFIROB vorgeschlagene Verfahren aus unterschiedlichen Perspektiven auf.

Kriterium	Für die EFFIROB-Studiendurchführung	Für Ausrüster und Endanwender
Anwendungsziel des Verfahrens	Technologiebedarfe identifizieren	SRS systematisch konzipieren
	Marktpotenziale bestimmen	Marktpotenzial SRS abschätzen
	Kostenfaktoren darstellen	Wirtschaftlichkeit bewerten
	EoS-Effekte quantifizieren	SRS-Hauptkostenträger optimieren
Methoden-Fokus	SRS für anwendungsübergreifende technische/wirtschaftliche Untersuchungen analysieren und aufbereiten	Einfache, intuitive SRS-Konzeption, technisch/wirtschaftliche Bewertung und Optimierung mittels Hilfsmitteln und Mustern
	Abhängigkeiten darstellen für „Wenn-dann-Analyse“ (EoS, FuE-Bedarfe)	Variantenbildung zur Konzeptoptimierung

Tab. 2.1 Anforderungen an das Verfahren zur Konzeption von Serviceroboter-Systemen (SRS) aus Sicht der Studiendurchführung und aus Sicht einer Nutzung durch Ausrüster oder Endanwender.

Methoden des SE, wie in der VDI-Richtlinie 2221 beschrieben, enthalten zwei wesentliche Phasen: die funktionelle Analyse und die konzeptionelle Gestaltung.¹³

- Bei der funktionellen Analyse wird die Aufgabenstellung in lösungsneutrale Problemstellungen übersetzt. Funktionen werden aus der Gesamtaufgabe durch Strukturierung und Untergliederung verfeinert oder dekomponiert. Hierzu sind

¹³ VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag, 1993.



VERWENDETE METHODEN

Modellierungsverfahren zur Dekomponierung von Funktionen in Funktionselemente oder „Primitive“ hilfreich.

- Die konzeptionelle Gestaltung umfasst das Finden von grob maßstäblichen Lösungsprinzipien und die Erstellung der Systemstruktur zu Gesamtkonzeptvarianten. SE-Methoden betonen den modularen Systemaufbau und die direkte Zuordnung zwischen Funktionen und Prinziplösungen.

Gesamtkonzeptvarianten werden gemäß ihrer Erfüllung der Anforderungskriterien gegeneinander verglichen. Das präferierte Gesamtkonzept wird zu einem Systementwurf (Fertigungsunterlagen, Zusammenbauzeichnung etc.) schrittweise verfeinert und optimiert.

Die Konzeption von Serviceroboter-Systemen in dieser Studie lehnt sich an die Methode des Axiomatic Designs (AD) an, die im Folgenden vorgestellt wird. Diverse, den Entwickler unterstützende Hilfsmittel werden vorgestellt.

KURZÜBERSICHT ÜBER DIE METHODE „AXIOMATIC DESIGN“ (AD)

Axiomatic Design (AD) wurde als Methode des Systems Engineering am Massachusetts Institute of Technology (MIT) vor ca. 20 Jahren mit dem Ziel entwickelt, die funktionelle Analyse und die Lösungssuche technischer Systeme in einem eng verwobenen Problemlösungszyklus als parallele Schritte durchzuführen und durch einfache Regeln zu steuern.¹⁴

Kundenanforderungen (die so genannte Customer Domain) zur Identifikation von Markt- und Kundenbedürfnissen an ein Produkt oder eine Anlage werden ausgelotet und fließen als Vorgabe zur Formulierung von Anforderungen bzw. Functional Requirements (FRs) in das Lastenheft ein. Die Anforderungen (in der Functional Domain) werden parallel zur Erarbeitung von Lösungsprinzipien oder so genannter Design Parameter (DPs, in der Physical Domain) unter Berücksichtigung zweier Axiome schrittweise verfeinert und quantifiziert. Die Lösung, dokumentiert im Pflichtenheft, wird in der Prozess-Domäne (Process Domain oder Ausarbeitungsphase) detailliert und optimiert, siehe Abbildung 2-1.1. Die Erarbeitung der Serviceroboter-Systemkonzepte erfolgt im Wesentlichen in den Functional und Physical Domains. Deshalb werden im Weiteren die Verfahrensschritte nur für diese beiden Domänen erläutert.

Domänen des Axiomatic Design

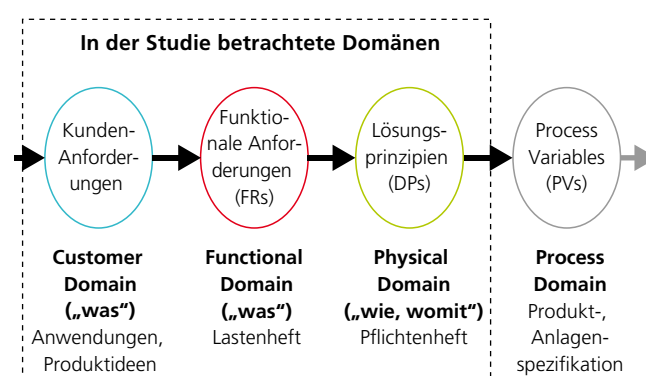


Abb. 2-1.1 Die in EFFIROB betrachteten Domänen des „Axiomatic Design“

Wesentliche Grundlage der Methode sind die beiden so genannten Unabhängigkeits- und Informationsaxiome zur Steuerung der parallel auszuführenden funktionellen Analyse und konzeptionellen Gestaltung:

- **Axiom 1** stellt die Unabhängigkeit der FRs sicher. Dies erfolgt durch die Überprüfung der Entkopplung zwischen FRs und DPs. FRs sind solange zu dekomponieren und zu quantifizieren, bis eine maximale Entkopplung und möglichst direkte Zuordnung der einzelnen FRs und DPs erreicht ist. Dieses Axiom betont die Modularisierung des technischen Systems.
- **Axiom 2** fordert die Minimierung des Informationsgehalts des gewählten Lösungsprinzips. Der Informationsgehalt ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit eines gewählten Lösungsprinzips (DP), die gestellte Anforderung (FR) zu erfüllen. Die Wahrscheinlichkeit der Lösungserfüllung ist zu bestimmen und zu optimieren.

Die Anwendung beider Axiome im Sinne der Studiendurchführung wird im Folgenden erläutert.

¹⁴ Suh, N. P.: *Axiomatic Design: Advances and Applications* (The Oxford Series on Advanced Manufacturing). New York: Oxford University Press, USA (May 17, 2001).

KURZÜBERSICHT ÜBER DIE METHODE „AXIOMATIC DESIGN“ (AD)

→ 1 ZIG-ZAGGING

1 Zig-Zagging

Charakteristisch für die AD-Vorgehensweise ist das so genannte Zig-Zagging: Parallel erfolgt die stufenweise Verfeinerung der Anforderungen (FRs) und die korrespondierende Suche nach den Lösungsprinzipien (DPs), siehe Abbildung 2-1.2:

- Zu einer Anforderung FR_i wird ein DP_i ermittelt („Zig“). Eine oder mehrere gefundene Lösungen werden mittels der beiden Axiome überprüft und die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit der Lösungserfüllung ausgewählt.
- Es erfolgt eine weitere Verfeinerung und Quantifizierung der FR_i („Zag“). Ein DP_i wird dabei in meist mehrere FR_i der nächsten Ebene verfeinert.
- Dieser Vorgang des Zig-Zagging wird so lange wiederholt, bis elementare und quantifizierbare Anforderungen einzelnen Lösungsmodulen oder -elementen gegenüberstehen.
- Die unterste Ebene der Bäume (die Blätter) ergeben jeweils das Lastenheft (in der Functional Domain) bzw. das Pflichtenheft (in der Physical Domain).

Wichtige praktische Anmerkungen zum Zig-Zagging

- Die Bäume geben weder Funktionsstruktur noch Systemstruktur eines Produkts oder einer Anlage vor, sondern zeichnen den Entwicklungsprozess einer funktionellen Analyse und einer konzeptionellen Gestaltung nach.
- Anforderungen werden üblicherweise als Substantiv und Verb formuliert.
- Jede Anforderung ist zu quantifizieren, insbesondere im Hinblick auf die zu erfüllende Präzisionsanforderung bzw. das zu erfüllende Toleranzmaß ϵ . Beispiel: Messen eines Abstands $d = 1\,000\text{ mm}$ mit einer Messabweichung von $\epsilon = 10\text{ mm}$. Da Präzisionsanforderungen als wesentlicher Kostenverantworter gelten, sind diese als Toleranz der FR_i so weit wie möglich zu spezifizieren; Anforderungen sollten also große Toleranzen beinhalten. Die System Range bezeichnet den Wertebereich der zu erfüllenden Anforderung FR_i einschließlich des Toleranzmaßes ϵ .
- Die Nummerierung der FRs und DPs sollte zur guten Übersicht konsistent sein.
- Das Zig-Zagging ist besonders effektiv im Team mittels Mo-

Das Zig-Zagging im Axiomatic Design

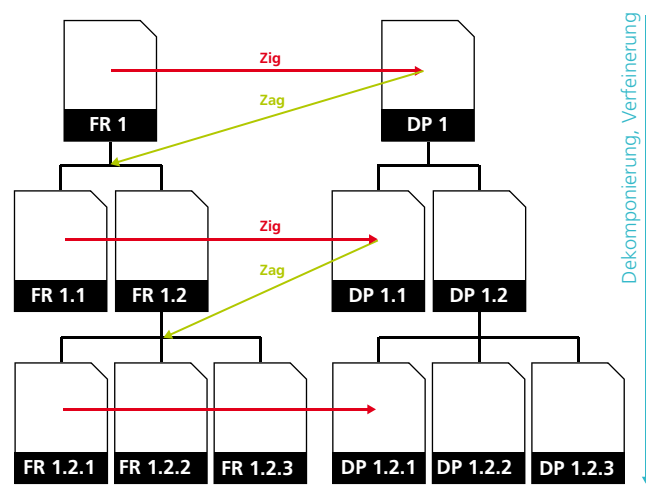


Abb. 2-1.2 Parallele Verfeinerung der Anforderungen (FRs) und der korrespondierenden Suche nach Lösungsprinzipien (DPs).

derationstechniken (z.B. durch Karten auf einer Pinnwand) umsetzbar.

- Es können mehrere Varianten in separaten Bäumen gleichzeitig entwickelt werden. Geeignete Software-Programme oder auch Tabellenkalkulationsprogramme vereinfachen die Verwaltung der Domains.

Anwendung des 1. Axioms (Unabhängigkeitsaxiom)

Die Überprüfung der Unabhängigkeit der FRs und DPs auf jeder Ebene lässt sich durch die so genannte Einfluss- oder Designmatrix überprüfen, siehe Abb. 2-1.3: Falls sich Änderungen eines DP_i auf weitere FR_i auswirken, ist das Design nicht entkoppelt, was eine Optimierung des technischen Systems erschwert.

Anwendung des 2. Axioms (Informationsaxiom)

Die Wahrscheinlichkeit oder der Grad der Funktionserfüllung einer Anforderung FR_i (System Range) durch ein Lösungsprinzip

KURZÜBERSICHT ÜBER DIE METHODE „AXIOMATIC DESIGN“ (AD)

→ 1 ZIG-ZAGGING

1. Axiom (Unabhängigkeitsaxiom) in AD

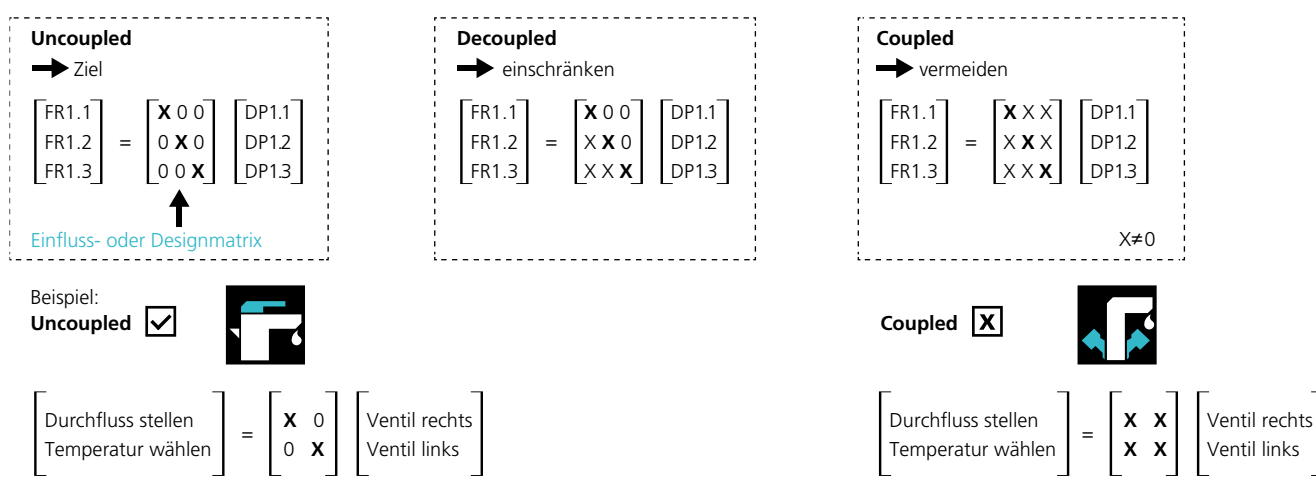


Abb. 2-1.3 Das Unabhängigkeitsaxiom in AD mit einem einfachen Beispiel (Wasserhahn)

DP_i (die Design Range bezeichnet hier den Wertebereich der Lösungs- bzw. Leistungserfüllung) wird durch die Überschneidung dieser beiden Bereiche als so genannte Common Range ausgedrückt (Abb. 2-1.4). Der Flächeninhalt $A_{cr} \leq 1$ zwischen der Wahrscheinlichkeitsdichte (pdf-Funktion) der Design Range und der System Range ergibt die Wahrscheinlichkeit der Funktionserfüllung durch das gewählte Lösungsprinzip DP_i bei gegebenem FR_i . Für eine vollständige Funktionserfüllung $A_{cr} = 1$ durch das gewählte Lösungsprinzip muss die Design Range innerhalb der System Range liegen, wie Abbildung 2-1.4 verdeutlicht. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (pdf) von Lösungsprinzipien DP_i ist in den wenigsten Fällen explizit oder ohne Experiment bestimmbar. Für diese Studie werden folgende in Abbildung 2-1.4 dargestellte Vereinfachungen angewendet:

- Anstatt die Wahrscheinlichkeitsdichte pdf der Funktionserfüllung des entsprechenden DP_i abzuschätzen, wird diese durch eine „schwarz-weiß“-Trennung in Form einer Rechteckfunktion vereinfacht.
- Die fortan verwendete Reduzierung der zweidimensionalen Graphik zu einer Dimension visualisiert, ob die Design Range innerhalb der System Range zu liegen kommt. Dies ist das Lösungsziel, wie in Abbildung 2-1.4 unten dargestellt.

Steuerung der Dekomponierung von Funktionen in AD

Sind korrespondierende FR_i (System Range) und DP_i (Design Range) nicht oder nur teilweise überlappend, müssen entweder die Anforderungen geändert oder ein neues Lösungsprinzip gesucht werden. Abbildung 2-1.5 zeigt Konstellationen einer Divergenz zwischen Anforderung und Lösungserfüllung:

- **Fall 1.** Die Design Range liegt zwar innerhalb der System Range, die Präzision der Funktionserfüllung durch das Lösungsprinzip ist jedoch weit höher als gefordert. Möglicherweise lässt sich ein kostengünstigeres Lösungsprinzip finden, das die Präzisionsanforderung gerade erfüllt.
- **Fall 2.** Die Design Range überlappt die System Range nur teilweise. Eine vollständige Erfüllung der Anforderung kann nicht erwartet werden. Entweder folgt die Suche nach einer Lösungsvariante oder die Anforderung muss überdacht werden, z.B. durch eine Aufteilung in zwei Teilfunktionen mit separaten Lösungsprinzipien.
- **Fall 3.** Eine Common Range existiert nicht, das Lösungsprinzip ist nicht geeignet. Anforderungsformulierung und Lösungssuche müssen neu erfolgen. Gegebenenfalls sind die Anforderungen neu zu formulieren oder bewusst alternative Lösungsstrategien zu wählen.

KURZÜBERSICHT ÜBER DIE METHODE „AXIOMATIC DESIGN“ (AD)

→ 1 ZIG-ZAGGING

Das 2. Axiom (Informationsaxiom) in AD und die für EFFIROB vorgeschlagene Vereinfachung

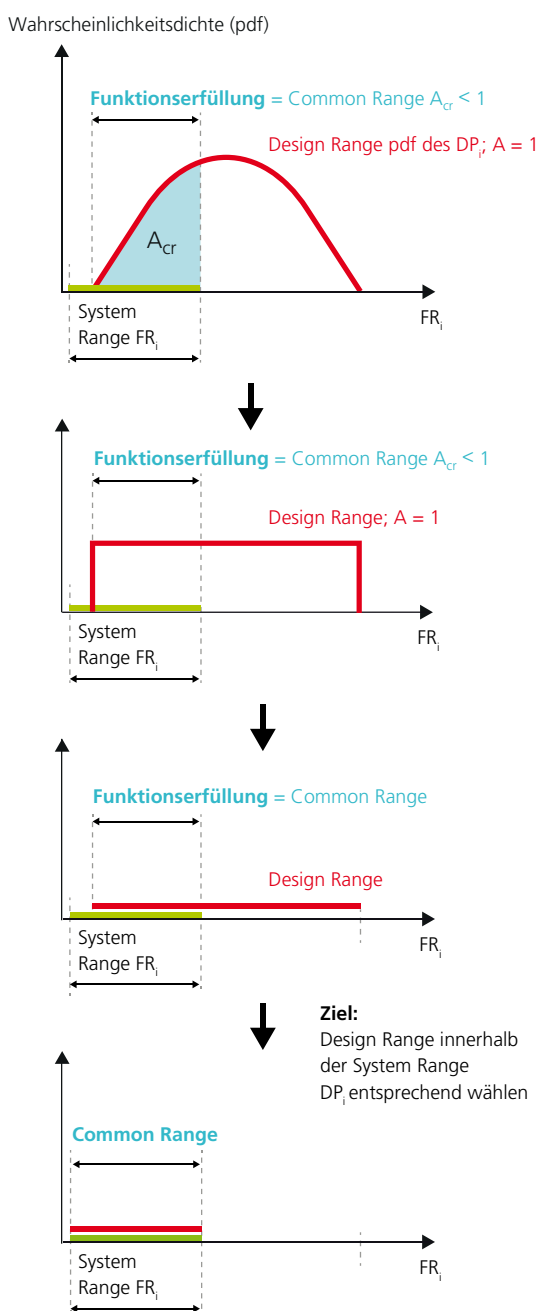


Abb. 2-1.4 Bestimmung der Funktionserfüllung eines Lösungsprinzip DP_i durch die Common Range sowie die in dieser Studie vorgeschlagene vereinfachte Abschätzung der Common Range

Steuerung der Dekomponierung von Funktionen in AD in Abhängigkeit der Common Range

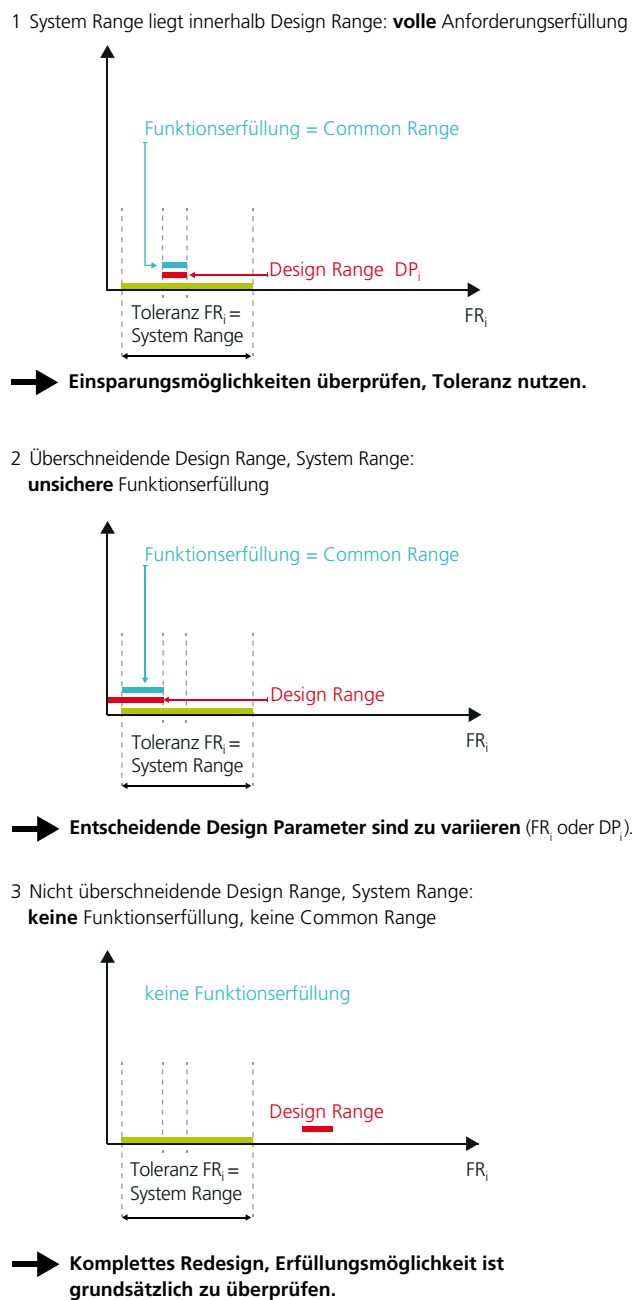


Abb. 2-1.5 Bewertung der Funktionserfüllung einer Lösung (Design Parameter DP_i) im Axiomatic Design

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 1 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DES ZU AUTOMATISIERENDEN DIENSTLEISTUNGSSZENARIOS

1 Auswahl und Charakterisierung des zu automatisierenden Dienstleistungsszenarios

Das Vorgehen nach der Methode des Axiomatic Designs für die Konzeption von Serviceroboter-Systemen erfordert die Bereitstellung typischer Hilfsmittel, die dem Techniker Wissen z.B. in Form von Modellen, Lösungskatalogen, Beispielen und Software-Werkzeugen zur Hand geben. Insgesamt 10 Hilfsmittel H1 bis H10 werden für die verschiedenen Phasen und Aufgaben des Entwicklungsprozesses im Folgenden vorgestellt und in den Steckbriefen angewandt:

- Auswahl und Charakterisierung des zu automatisierenden Szenarios bzw. der geplanten Serviceroboter-Anwendung (siehe Customer Domain, Ausloten der Kundenanforderungen, Abbildung 2-1.1).
- Funktionale Analyse zur Extraktion der Anforderungen FR_i für das Lastenheft.
- Finden von Lösungsprinzipien DP_i und Erstellung der Gesamtkonzeption sowie technische und wirtschaftliche Bewertung des Serviceroboter-Systems.

Durch Expertengespräche erfolgt die Auswahl eines Szenarios innerhalb der betrachteten Zielmärkte, siehe [Kapitel 2.4.1](#), sowie die Formulierung der Hauptanforderungen und -Funktionen. Mithilfe eines Anwendungsfall-Diagramms erfolgt die intuitive Modellierung der Hauptfunktionen, die Festlegung der Akteure und die Definition der Systemgrenzen. Akteure sind definitionsgemäß nicht nur beteiligte Personen, sondern können auch Systeme oder Systemkomponenten und dergleichen sein.



Hilfsmittel 1: Anwendungs- und Sequenzdiagramm zur Modellierung von Arbeitssystemen

Die Automatisierung des Dienstleistungsszenarios setzt die Kenntnis der Prozesse, der Prozessabläufe und elementarer geometrischer Vorgaben voraus. Dies wird mithilfe eines Arbeitssystem-Modells erfasst. Ein Arbeitssystem ist nach REFA wie folgt definiert und in Abbildung 2-2.1 als Modell in der OPM-Notation dargestellt.¹⁵

- Das Arbeitssystem besteht aus Arbeitsaufgabe, Arbeitsobjekt, Betriebsmittel, Mensch/Werker und Umgebung.
- Der Arbeitsablauf ändert die Arbeitsaufgabe von „unbeendet“ nach „beendet“.
- Der Werker führt den Arbeitsablauf aus.
- Der Werker nutzt Betriebs- oder Arbeitsmittel.
- Der Arbeitsablauf erfordert Arbeitsobjekte bzw. Betriebsmittel.

Für die Modellierung ist es unwesentlich, ob es sich bei dem Arbeitssystem um einen Montagearbeitsplatz oder eine Dienstleistung handelt.

Das bestehende oder herkömmliche Arbeitssystem wird hier als Ausgangsszenario bezeichnet, das durch Robotereinsatz modifizierte Arbeitssystem als Serviceroboter-Szenario.

Das Anwendungsfall-Diagramm (Use Case) stellt keine Ablaufbeschreibung dar, im Gegensatz zum Sequenz-Diagramm, das den Arbeitsablauf visualisiert und somit Zeit- und Mengengerüste in Arbeitssystemen erfassen hilft. Zweckmäßigerweise werden die Komponenten des Arbeitssystems als Kopf der Lebenslinien gewählt und deren Interaktion bzgl. Nachrichten und Prozesse durch Pfeile dargestellt, siehe Abbildung 2-2.2.

¹⁵ REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hrsg.): *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Lexikon der Betriebsorganisation*. München: Carl-Hanser, 1993.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 1 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DES ZU AUTOMATISIERENDEN DIENSTLEISTUNGSSZENARIOS

Modell des Arbeitssystems

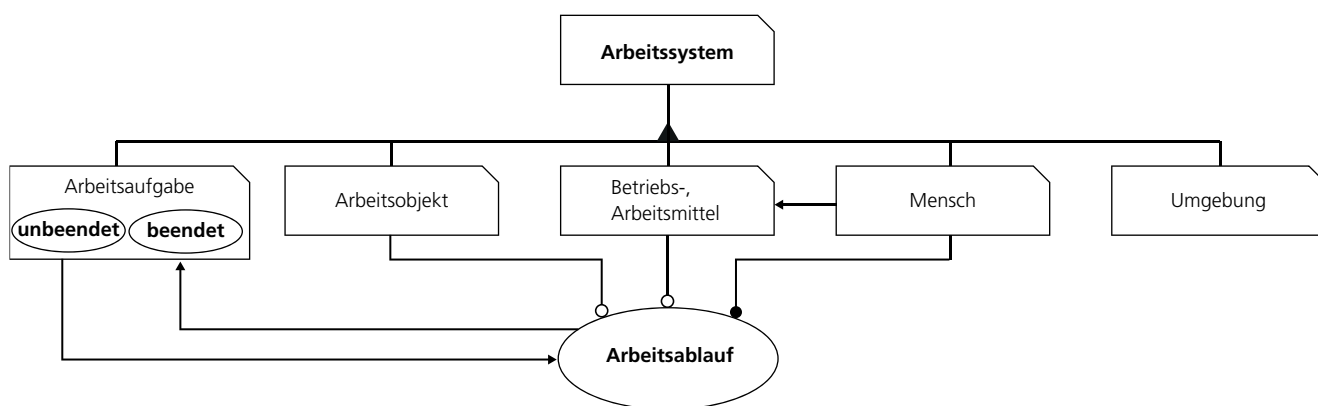


Abb. 2-2.1 Modell des Arbeitssystems nach REFA (Notation gemäß Object-Process Methodology)¹⁶

Anwendungsfall- und Sequenzdiagramm

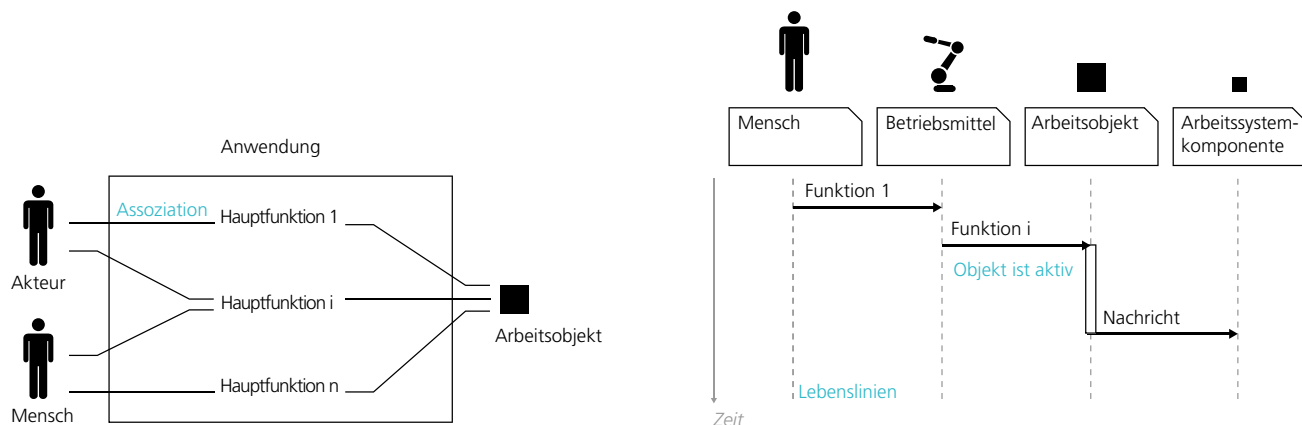


Abb. 2-2.2 Basisstruktur des Anwendungsfall- und Sequenz-Diagramms mit Beispieleintragungen

16 Dori, D.: Object-Process Methodology – A Holistic Systems Paradigm. New York: Springer Verlag, 2004.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 2 FUNKTIONALE ANALYSE DES AUSGANGSSZENARIOS

gungs- oder Greiffunktionen, siehe Tabelle 2-2.3. Die Analyse und Modellierung kognitiver Funktionen wird in dieser Studie nicht weiter untersucht.

Die Konzeption des SRS wird erleichtert, wenn das Ausgangsszenario in einer lösungsgerechten und für die weitere mechatronische Entwicklung nutzbaren Form beschrieben und modelliert wird. Dies trifft für die Modellierung und Spezifizierung der Wahrnehmungs- und Bewegungsfunktionen zu, insbesondere in Bezug auf die mit dem Arbeitsobjekt verbundenen Funktionen. Praktisch erfolgt diese Modellierung durch die Dekomponierung von Funktionen in Elementarfunktionen oder Primitive unterschiedlicher Klassen: ¹⁸

- **Wahrnehmungprimitive** erfüllen eine Erkennungsfunktion. Resultate sind beispielsweise bei Objekten die Lokalisierung, Identifizierung oder Maßbestimmung sowie bei Relativbewegungen von Objekten die Messung von mechanischen Größen wie Kräfte oder Momente.
- **Bewegungprimitive** sind geführte Bewegungen von Arbeitsmitteln oder Arbeitsobjekten ohne wirkende Zwangsbedingungen.
- **Greifprimitive** beschreiben den Form- oder Kraftschluss beim Greifen oder Sichern von Objekten.

- **Sensomotorische Primitive** sind sensorgestützte, geregelte Bewegungen von Arbeitsmitteln oder Arbeitsobjekten, die Zwangsbedingungen (Reaktionskräfte aufgrund von Bindungen oder räumlichen Einschränkungen) unterliegen.

Die Modellierung des Szenarios kann zweckmäßigerweise durch einen Szenengraph erfolgen (Abbildung 2-2.4), womit folgende geometrische und kinematische Anforderungen verständlich definiert werden:

- Ort und Bewegung von Arbeitsobjekten, Arbeitsmittel, Menschen und Umgebungsanteilen (Begrenzungen)
- den Objekten zuordenbare charakteristische Merkmale (später sensoruell zu erkennende Merkmale oder Features)
- Relativbewegungen und Interaktion (Bindungen) zwischen Objekten
- Beobachtungsorte.

Ausführen		Wahrnehmen			
Bewegungsfunktionen		Greiffunktionen		Wahrnehmungsfunktionen	
Ohne Wahrnehmung	Mit Wahrnehmung	Greifen ohne Wahrnehmung	Greifen mit Wahrnehmung	Berührungslos	Berührend
Move von → nach Punkt-zu-Punkt PTP-Bewegung	Geometrische Bindung von 1D bis 6D	„Auf, zu“: Greifen, Halten und Sichern	Geometrische Bindung (Abstand)	1D: Abstand, 2D: Linien, 3D: Flächen	1D bis 6D: Punkt- bis 3D-Flächenkontakt
Move von → nach (um, entlang, über etc.); CP-Bewegung	Kraft-Momenten-Bindung von 1D bis 6D		Kraftbindung (taktil): Punkt, Linie, Fläche	Texturen, sonstige Merkmale: Personen (z.B. Gesicht)	

Tab. 2-2.1 Bewegungs-, Greif- und Wahrnehmungsfunktionen

¹⁸ Finkemeyer, B.: *Robotersteuerungsarchitektur auf der Basis von Aktionsprimitiven*. Diss. TU Braunschweig, Aachen: Shaker-Verlag, 2004.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 2 FUNKTIONALE ANALYSE DES AUSGANGSSZENARIOS

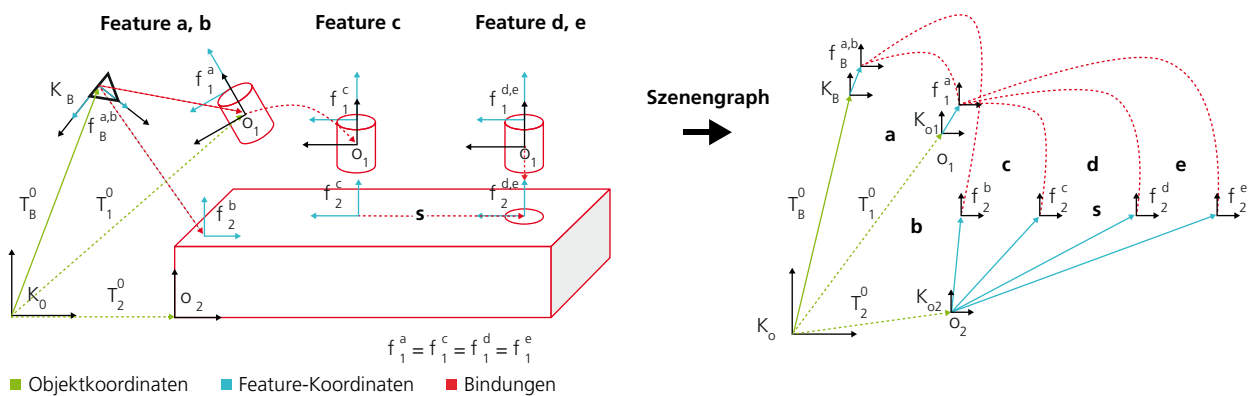
Hilfsmittel 2: Szenengraph und iTASC-Formalismus

Szenengraph und iTASC-Formalismus (instantaneous task specification using constraints) haben sich als Methoden zur Spezifikation von Roboterbewegungen bei komplexen Aufgaben bewährt. Bewegungs-, Greif-, Wahrnehmungs- und sensomotorische Primitive von Arbeitssystemen lassen sich nach einfachen Schemata modellieren und spezifizieren. Der iTASC-Formalismus wird in EFFIROB zur Beschreibung von Arbeitssystemen angewandt, um Anforderungen an ein automatisiertes Dienstleistungsszenario systematisch abzuleiten. Der iTASC-Formalismus ist eine Methode zur Spezifikation von geometrisch bzw. mechanisch gebundenen Relativbewegungen zwischen Objekten. Hierzu werden die Bindungen oder Zwangsbedingungen von Relativbewegungen zwischen

(typischerweise) zwei Objekten mit Hilfe von physischen oder abstrakten Objektmerkmalen (so genannte Features wie Symmetrieachsen, Flächen, Mittelpunkte etc.) anhand eines lokalen Feature-Koordinatensystems f modelliert. Der Formalismus ist neben der Beschreibung von Bewegungen genauso auf die Modellierung von Wahrnehmungsfunktionen übertragbar. In diesem Falle beziehen sich Features auf charakteristische Merkmale wie Texturen, Kanten, künstliche Markierungen etc., die durch Sensoren erfassbar wären.¹⁹

Der Szenengraph gibt die geometrische und kinematische Struktur des Arbeitssystems wieder und modelliert die Bindungen zwischen den Objekten mittels kinematischer Schleifen.

Beispielszenario: Primitive und Merkmale (Features)



Primitive	Feature	Sequenz
Wahrnehmung	Feature a, b	Lokalisierung der Objekte o_1 und o_2 anhand ihrer Features f_1^a, f_2^b
Bewegung ohne Bindung	Feature c	Punkt-zu-Punkt Bewegung von o_1 gegenüber o_2 mit Abstand d zur z-Achse f_2^c
Bewegung mit geometrischer Bindung	Feature d	Bewegung von o_1 gegenüber o_2 entlang der gegebenen Trajektorie s im Abstand d zur Oberfläche von o_2
Bewegung mit mechanischer Bindung	Feature e	Zwangsgeführte Bewegung von o_1 gegenüber o_2 (Bolzen-Loch-Problem, Flächenkontakt)

Abb. 2-2.4: Beispiel-Szenario mit einfachem Bewegungsablauf und korrespondierendem Szenengraph

¹⁹ Smits, R.: Design of a constraint-based methodology and software support. Dissertation Katholieke Universiteit Leuven – Faculty of Engineering, Mai 2010.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 2 FUNKTIONALE ANALYSE DES AUSGANGSSZENARIOS

Die Leistungsfähigkeit des iTASC-Formalismus geht weit über den für die Studienziele erforderlichen statischen Betrachtungsfall der Spezifikation von Ausgangsszenarien hinaus und schlägt eine Brücke zur Auslegung und Optimierung des regelungstechnischen (dynamischen) Verhaltens von Robotern bei der Ausführung komplexer sensomotorischer Primitive.

Dabei wird die Abschätzung der Ausführbarkeit von sensomotorischen Primitiven wird auch bei komplexen Zwangsbedingungen von Bewegungsvorgaben unter idealisierten Geschwindigkeitsregelungen (Velocity Control) möglich.²⁰ Die Spezifikation und Darstellung von Primitiven lässt sich bestens mit AD verbinden, indem FRs und ihre Toleranzbereiche systematisch erfasst werden in Bezug auf:

- Anforderungen an die Beweglichkeit (der Führung von Arbeitsobjekten und Arbeitsmittel), an Form und Volumen des Arbeitsraumes sowie Anforderungen an die Positionier- und Bewegungsgenauigkeiten.
- Anforderungen an Sensoren zum Erfassen von Bewegungen, Objektlagen, Umgebungskonturen, (Wertebereiche, und damit verbundene Genauigkeiten) sowie Sensoren zur Messung von Kräften und Momenten.

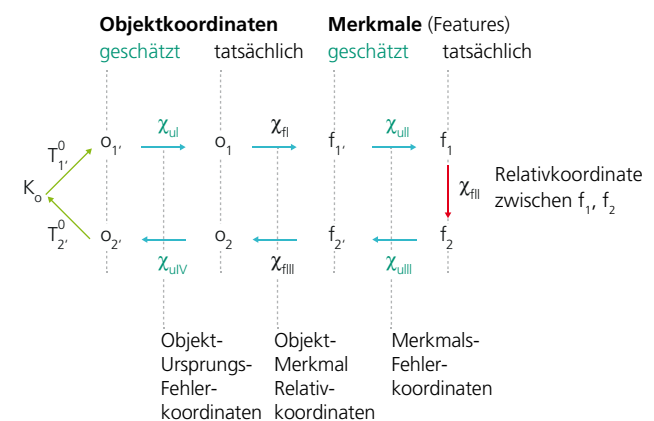
Die systematische Modellierung von Unsicherheiten und Toleranzen als Ursache möglicher Störgrößen für die Ausführung von Wahrnehmungs- oder sensomotorischen Primitiven ist Teil des iTASC-Formalismus, wird aber im Rahmen dieser Studie, wie nachfolgend skizziert, vereinfacht modelliert. Die Einführung von Koordinatensystemen, die angenommene Unsicherheiten bzw. Toleranzen in Bezug auf die Ausführung von Primitiven als zusätzliche Feature-Koordinaten χ_{ij} quantifizieren, ist einfach machbar und zur Bewertung der Ausführung (Regelbarkeit) von sensomotorischen Primitiven hilfreich, siehe hierzu Abbildung 2-2.5. Hierbei ergeben:

- χ_{fii} die Anforderung an das Primitiv, in Bezug auf z.B. Abstand, Kraft etc.

- χ_{uII} und χ_{uIII} die geschätzten Toleranzen an die Ausführung des Primitivs an.

Eine explizite Abschätzung der Ausführbarkeit von sensomotorischen Primitiven (siehe pdf-Verlauf in Abbildung 2-1.4) wird im Sinne des 2. Axioms des AD möglich. Für die weitere Modellierung der Primitive in dieser Studie werden mögliche Unsicherheiten nicht als Koordinaten χ_{ij} explizit modelliert, sondern es werden Toleranzwerte in Bezug auf die Funktionsanforderung FR_i aus den Toleranzkoordinaten χ_{uII} und χ_{uIII} geschätzt.

Modellierung der Bindungen zwischen o_1, o_2



Bez.	Koordinaten
o_1, o_2	Ist-Objektkoordinatensysteme
o_1', o_2'	Geschätzte Objektkoordinatensysteme
χ_{fii}	Koordinaten des geschätzten o_1 -Merkmals f_1 bzgl. des Koordinatensystems von o_1 (Relativ-Koordinaten)
χ_{fiii}	Relativ-Koordinaten (Bindungen) zwischen Feature f_1 und f_2
χ_{fiiii}	Relativ-Koordinaten zwischen geschätztem Merkmal f_2 und Ist-Objektkoordinaten o_2
χ_{uII}, χ_{uIV}	Toleranz zwischen geschätztem und realem Objektkoordinatensystem
χ_{uIII}, χ_{uIII}	Toleranz zwischen geschätztem und Ist- o_2 -Merkmal

Abb. 2-2.5 Modellierung der Toleranz und Unsicherheitskoordinaten im iTASC-Formalismus

²⁰ Smits, R.; Laet, T. de et al.: iTASC: a tool for multi-sensor integration in robot manipulation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI 2008.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 2 FUNKTIONALE ANALYSE DES AUSGANGSSZENARIO

Vorgehensweise bei der Modellierung des einfachen Beispiel-Szenarios aus Abbildung 2-2.4:

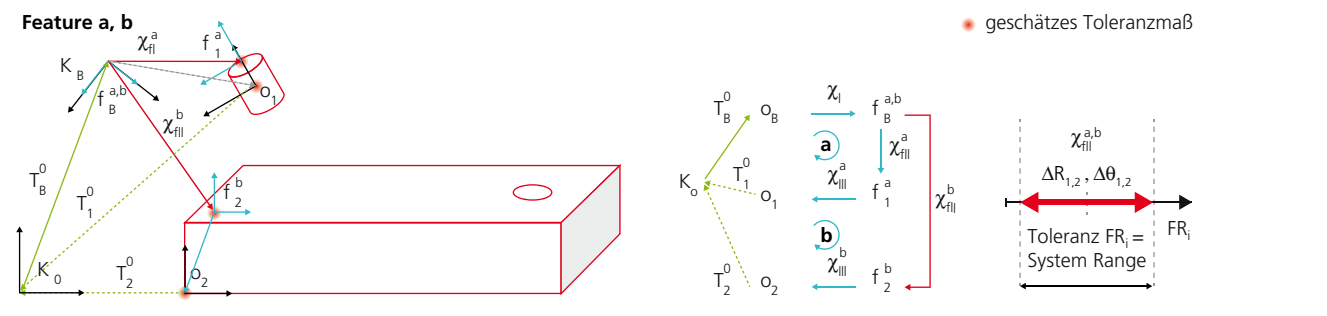
- Objekte o_j der Szene werden mit einem körperfesten Koordinatensystem K_{Oj} versehen.
- Beobachtersystem K_B der Szene (zur Identifizierung, Lokalisierung von Objekten, Umgebungen, Personen) werden festgelegt, z.B. aus der Blickrichtung des Werkers.
- den Objekten o_1, o_2 werden Merkmale (Features), wie beispielsweise f_1^a, f_2^b zugeordnet und diese durch Feature-Koordinatensysteme festgelegt. Features charakterisieren Interaktionsorte (Punkte, Linien, Flächen) oder andere „Points of Interest“. Anhand dieser Merkmale werden Primitive beschrieben.
- Bindungen oder Zwangsbedingungen in Bezug auf Geometrie, Geschwindigkeiten, eingeprägte Kräfte werden mittels der jeweiligen Feature-Koordinaten χ_{fil} definiert.

In Bezug auf das o.g. Beispiel ergibt sich, wobei Koordinatensysteme möglichst parallel zueinander zu wählen sind, folgende Charakterisierung der Szene:

- Die Szene besteht aus dem Objekt o_2 (genaue Position unbekannt) mit Loch. In das Loch wird Objekt o_1 gesteckt („Bolzen-Loch-Problem“, Flächenkontakt), Abb. 2-2.4.
- Die Szene wird aus den Koordinaten des Beobachters $f_B^{a,b}$ (im automatisierten Szenario letztlich über einen Sensor) erfasst.
- o_2 wird über das Feature f_2^b vom Ort $f_B^{a,b}$ aus erkannt ($\chi_{fil}^{a,b}$), der Ansatz der Fügebewegung von o_1 in o_2 wird über Feature f_2^e (Koordinaten χ_{fil}^e) dargestellt.
- Objekt o_1 wird durch das Feature f_1^a erkannt. f_2^e gibt den Interaktionsort der Fügebewegung an. Die Fügebewegung erfolgt zwischen f_1^e und f_2^e .

Demgemäß ergeben sich die Feature-Koordinaten und damit die Anforderungen und Toleranzen (System Range: „was gefordert wird“) zur weiteren Untersuchung im AD wie folgt in Tab. 2-2.2 dargestellt:

Lokalisieren der Objekte o_1, o_2 ; Features a, b



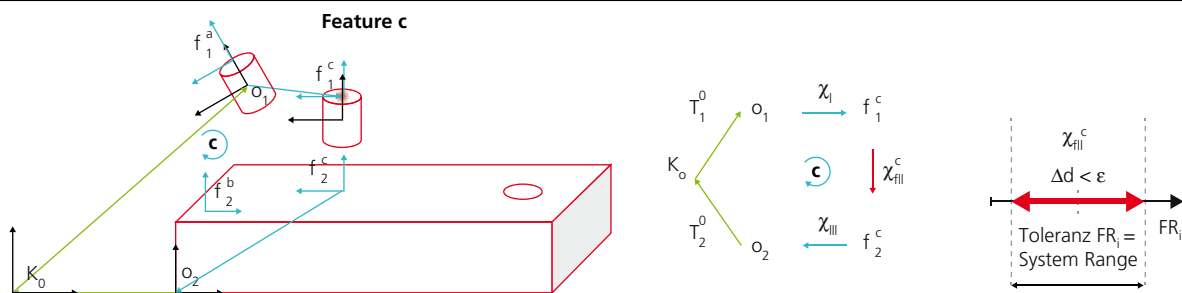
<p>Lokalisieren der Objekte o_1, o_2 anhand der Features f_1^a, f_2^b von $f_B^{a,b}$ aus.</p>	<p>Wie genau müssen χ_{fil}^a und χ_{fil}^b (z.B. in Polarkoordinaten R, θ) zur Ortung der Features f_1^a, f_2^b aufgelöst werden?</p>	<p>FR_1 (Lokalisierung): Wertebereich für Polarkoordinaten $R_{1,2}, \theta_{1,2}$ sowie geforderte Messauflösung $\Delta R_{1,2}, \Delta \theta_{1,2}$.</p>
---	---	---

>>

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 2 FUNKTIONALE ANALYSE DES AUSGANGSSZENARIOS

PTP-Bewegung ohne Bindung; Feature c

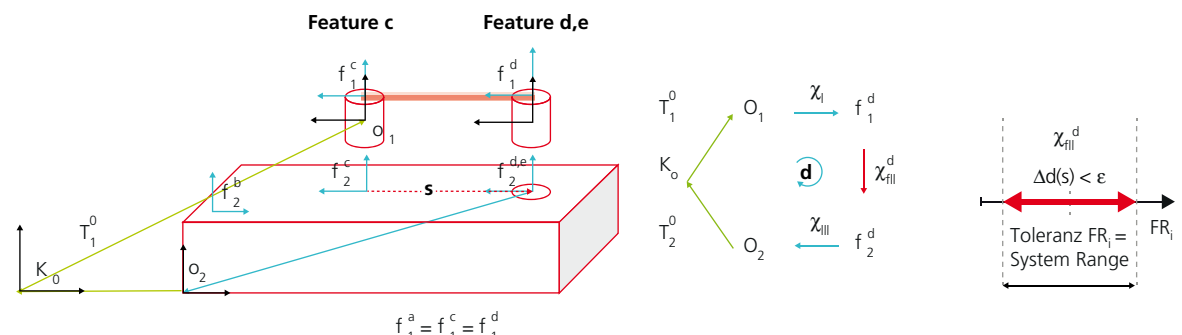


PTP-Bewegung von o_1 gegenüber o_2 ; Stopp bei f_2^c mit Abstand d normal zur Oberfläche von o_2 in z-Richtung von f_2^c .

Innerhalb welchem Fehlermaß ϵ muss Objekt o_1 , die Zielkoordinaten $\mathbf{x}^c = (0, 0, d, 0, 0)^c$ von f_2^c treffen?

FR_i (Fehlermaß der Lagegenauigkeit): $\Delta d < \epsilon$ am Ort $\mathbf{x}^c = (0, 0, d, 0, 0)^c$ von f_2^c .

CP-Bewegung entlang Vektor \mathbf{s} ; Features c, d

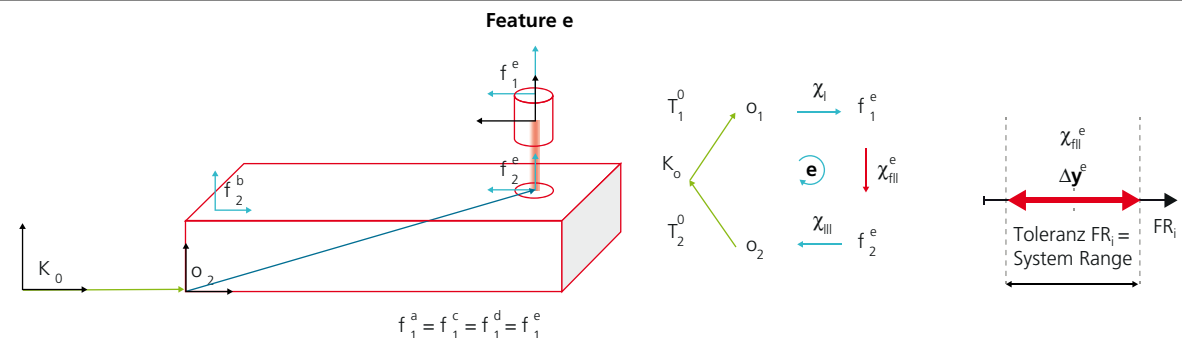


CP-Bewegung (Verschiebung um Vektor \mathbf{s}) von o_1 gegenüber o_2 . Stopp bei f_2^d mit Abstand d normal zur Oberfläche o_2 .

Innerhalb welchem Fehlermaß ϵ weicht Objekt o_1 quer zum Verschiebungsvektor \mathbf{s} ab?

FR_i (Fehlermaß der Lagegenauigkeit): $\Delta d(\mathbf{s}) < \epsilon$ entlang Vektor \mathbf{s} .

Bewegung mit mechanischer Bindung; Feature e



Zwangsführte Bewegung von o_1 entlang der z-Achse von f_2^e gegenüber o_2 (Bolzen-Loch-Problem, Flächenkontakt).

Wie genau werden die Bindungskordinaten χ_{III}^e (als Kräfte oder Abstände) eingehalten (Regelabweichungen)?

FR_i (Vektor der Regelabweichungen $\Delta \mathbf{y}_i$) bzgl. Bindungskordinaten $\Delta \mathbf{y}^e = (\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha, \Delta \beta)^e$

Tab. 2-2.2 Feature-Kordinaten, Anforderungen und Toleranzen des Beispiels aus Abbildung 2-2.5. Die roten Kästen und Kreise bezeichnen Orte abgeschätzter Toleranzen bzw. Ungenauigkeiten.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 2 FUNKTIONALE ANALYSE DES AUSGANGSSZENARIOS

Als Schema mit beispielhaften Variablen und Größen ergeben sich aus dem einfachen Beispiel in Tabelle 2-2.3 zusammenfassend folgende Anforderungen FR_i an die einzelnen Primitive:

In Bezug auf den Bewegungsschritt (Feature e) kann die Fügebewegung entweder durch Regeln der Lagen von o₁ gegenüber o₂ innerhalb der Toleranzen geführt werden oder über Limitierung der Reaktionskräfte zwischen o₁ und o₂, die sich durch das Hookesche Gesetz $\mathbf{F}^e = \mathbf{K}^e \chi_{III}^e$ mit der lokalen Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} angeben lassen. Details zur Formulierung der Bindungen mittels des iTASC Formalismus siehe Fußnote 20.

Schritt	Feature	χ_I	χ_{II}	χ_{III}	FR _i	Toleranz FR _i	Bemerkung
Lokalisierung o ₁ , o ₂	a, b	-	R ₁ , θ ₁ R ₂ , θ ₂	(0, 0, z _a , 0, 0, 0) ^a (x _b , y _b , z _b , 0, 0, 0) ^b	Messgrößen: R _{1,2} , θ _{1,2}	ΔR _{1,2} , Δθ _{1,2}	χ _{II} in Polarkoordinaten gegeben.
PTP-Bewegung ohne Bindung	c	-z _c	(0, 0, -d, 0, 0, 0) ^c	(x _c , y _c , z _c , 0, 0, 0) ^c	Lage von o ₁ bzgl. f ₂ ^c . $\mathbf{x}^c = (0, 0, 0, 0, 0, d)^c$	Positionsfehler Δd < ε bzgl. \mathbf{x}^c	d: Abstand zwischen f ₁ ^c und f ₂ ^c .
Bewegung entlang Vektor s (mit geometrischer Bindung)	d	-z _c	$\mathbf{s} = (s_x, s_y, s_z, \alpha, \beta, \gamma)^c$	(x _d , y _d , z _d , 0, 0, 0) ^d	Abweichung der Objektlage Δd(s) < ε (entlang Positions-, Richtungs-Vektor) s	Δs: Betrag der Positioniergenauigkeit	Bahnabweichung entlang \mathbf{s} ; hier ohne weitere Geschwindigkeitsvorgabe entlang \mathbf{s} .
Bewegung mit mechanischer Bindung	e	-z _c	(x, y, α, β) ^e	(x _e , y _e , z _e , 0, 0, 0) ^e	y ₁ =x ^e y ₄ =α ^e y ₂ =y ^e y ₅ =β ^e	Δx ^e , Δy ^e , Δα ^e , Δβ ^e	Regelgrößen $\mathbf{y} = (x^e, y^e, \alpha^e, \beta^e)^T$ oder Kräfte/Momente über Hookesches Gesetz.

Tab. 2-2.3 Beispielhafte Vorgehensweise zu Feature-Koordinaten, Anforderungen FR_i und Toleranzen

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 3 KONZEPTION DES SERVICEROBOTER-SYSTEMS

3 Konzeption des Serviceroboter-Systems

Der Dekomponierungsbaum in AD darf nicht mit einer Funktionsstruktur auf der Seite der Functional Domain oder einer Systemarchitektur auf der Seite der Physical Domain verwechselt werden. Die Lösungskomponenten in den Blättern des DP-Lösungsbaums ergeben, wie in [Kapitel 2.1.1](#) beschrieben, die Stückliste der Hauptkomponenten des Serviceroboter-Systems. Damit die Bäume übersichtlich bleiben, sollte die Detailtiefe und der Komponentenumfang begrenzt werden. Typische, auch im Team gut machbare Konzeptionen zeigten folgende Detaillierungstiefe (siehe auch die Steckbriefe):

- 4 bis 5 Dekomponierungsebenen beim „Zig-Zagging“
- 15 bis 20 Schlüsselfunktionen
- 2 bis 3 Varianten, die zweckmäßigerweise durch verschiedene Bäume repräsentiert und ausgearbeitet werden.

Die Herausforderung im AD liegt im Finden bzw. der Auswahl und Bewertung von Lösungsprinzipien und die Kombination der Lösungskomponenten zu SRS. Hierzu kann der Techniker/Konstrukteur sich auf Konventionen, Vorarbeiten und verfügbare Lösungskomponenten abstützen. Folgende Hilfsmittel lassen sich für die Konzeption von SRS nutzen, wobei diese nicht vollständig sind und auch einem laufenden technischen Fortschritt unterworfen sind:

- **Kinematik-Kataloge** zur Auswahl passender Roboterkinematiken, um den Arbeits- bzw. den Bewegungsraum zur Ausführung der Aufgabe abzudecken und die erforderliche kinematische Beweglichkeit vorzuhalten. Zur Aufgabenausführung können hier Standardkinematiken bzw. Standard-Robotermodule eingesetzt, konfiguriert oder zumindest adaptiert werden. Einen Kinematik-Katalog gibt beispielhaft [Kapitel 5.1](#) wieder.
- **Komponenten-Kataloge** umfassen typische Schlüsselkomponenten der Servicerobotik wie mobile Plattformen, Sensoren, Greifer, Sicherheitseinrichtungen, etc.

In jedem Falle werden während des AD die Anforderungen FR_i mit den jeweiligen Parametern und Leistungsdaten der Komponenten verglichen und entweder der Lösungsprozess adaptiert oder die entsprechenden Anforderungen FR_i,

Lösungskomponenten werden kombiniert, wobei es hier entsprechende Referenzmodelle des Roboteraufbaus oder Software-Architekturen gibt. Vereinfachte Modelle zeigt Abbildung 2-2.6. Die vorliegende Studie betrachtet nicht die Ebene typischer kognitiver Funktionen (Handlungsplanung, Mensch-Roboter-Kommunikation oder maschinelles Lernen, etc.), sondern geht von weitgehend vorgegebenen Aufgabenabläufen (Ablaufprogrammen) aus.



Hilfsmittel 3: Serviceroboter-Referenzmodell

Ein einfaches Modell eines Serviceroboter-Systems im Sinne der Studie zeigt Abbildung 2-2.6. Es beinhaltet alle Elemente eines Arbeitssystems (Umgebung, Mensch, Betriebsmittel, Arbeitsobjekt und Arbeitsaufgabe) und weiterhin:

- Das Serviceroboter-System (SRS) besteht im allgemeinen Fall aus mobiler Basis, Arm, Greifer oder Werkzeug.
- Teil des SRS ist das Mensch-Maschine-Interface (MMI) zur Bedienung, Programmierung und Wartung.
- Teil des SRS können externe Aktuatoren, Sensoren und Hilfen zur Umgebungsstrukturierung (Marker) sein.
- Das SRS führt den Arbeitsablauf (ggf. arbeitsteilig mit dem Mensch bzw. Bediener) aus.



Hilfsmittel 4: Serviceroboter-Software-Architektur

Die Software von Robotersystemen muss zur Laufzeit vielfältige Prozesse nebeneinander erledigen: von der Regelung einzelner Aktuatoren in enger sensomotorischer Kopplung bis hin zu Entscheidungsaufgaben, die dem Roboter ein autonomes Verhalten ermöglichen sollen. Zudem soll die Roboter-Software nach gängigen Regeln der Strukturierung von Softwaresystemen modular und erweiterbar aufgebaut sein. Aufbau und Organisation der Serviceroboter-Software im Sinne von so genannten hybriden Architekturen sehen eine hierarchische Aufteilung der Software in meist drei Ebenen vor:

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 3 KONZEPTION DES SERVICEROBOTER-SYSTEMS

- In der obersten Ebene (Planungsebene), Abbildung 2-2.6, werden in Modellen der aktuelle Zustand des Roboters sowie mögliche, vom Roboter durchführbare Aktionen (Primitive) beschrieben, die der Roboter in der Umwelt durchführen kann. Die Aktionen verändern den Zustand (zunächst nur im Modell), so dass mit Hilfe eines Planungsalgorithmus für einen vorgegebenen Zielzustand eine Folge von Aktionen bestimmt werden kann, die zu dem gewünschten Zielzustand führt. Diese Aktionsfolge bildet den Plan, der an die nächste Ebene der Architektur, die Ablaufsteuerung (z.B. als Skript), übergeben wird. Umgekehrt informiert diese die Planungsebene über erfolgte Zustandsänderungen in der realen Welt, so dass die Planungsebene das Modell anpassen kann.
- Die mittlere Ebene (Ausführungsebene) setzt die geplanten Abläufe der Planungsebene auf die realen Hardwarekomponenten um. Neben einer geeigneten Kommunikationsstruktur (Middleware) zwischen Planungs- und reaktiver Ebene schließt die Ausführungsebene vor allem die Dekomposition des geplanten Ablaufs in sensomotorische Primitive (auch „sequencing“ genannt) und deren Ausführung und Überwachung mit ein.
- Die untere Ebene der Architektur (auch Skill- oder reaktive Ebene) kapselt die elementaren Wahrnehmungs- und Bewegungsfunktionen sowie sensomotorische Primitive des Roboters meist innerhalb von Regelkreisen.

Die hybride Kontroll-Architektur verfolgt den Zweck, planende (deliberative) und reaktive Abläufe geordnet zusammenzubringen. Das Softwaresystem wird meist als Geflecht von interagierenden Komponenten strukturiert. Eine Software-Komponente ist dabei eine granulare Einheit, die Algorithmen und Zustände kapselt, und diese über eine definierte Schnittstelle für andere Komponenten zugreifbar macht. Die „Hardware-Abstraction“-Schicht trennt die (mechatronischen) Roboterkomponenten von der Ausführungsebene. Dies unterstützt Modularität und Portabilität der Hardware- und Software-Komponenten.

Referenzmodell des Serviceroboter-Systems

- Umgebung
- Mensch, Bediener
- Betriebsmittel
- Arbeitsobjekt
- Arbeitsaufgabe
- Roboterkinematik
- Externe Sensoren
- Externe Aktuatoren
- MMI
- Marker

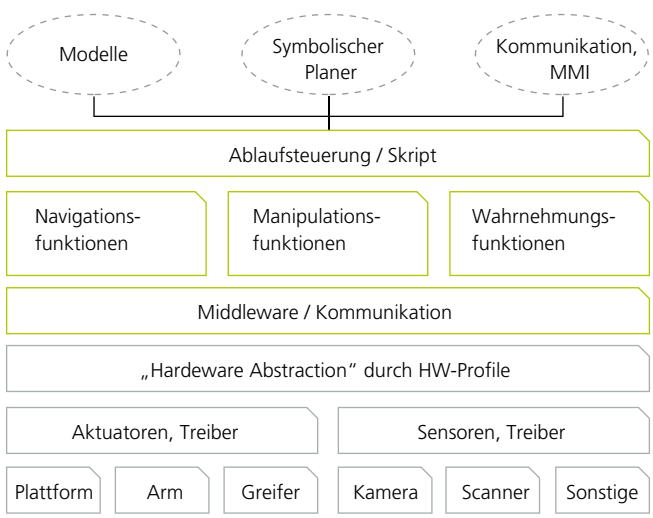


Abb. 2-2.6 Architektur und Serviceroboter-Referenzmodell



METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 3 KONZEPTION DES SERVICEROBOTER-SYSTEMS



Hilfsmittel 5: Kinematik-Katalog

Ausgehend von dem iTASC-Formalismus, in dem sich erforderliche Arbeitsräume durch kinematische Vorwärtsrechnung überschlagen lassen, kann die für das SRS geeignete kinematische Kette mittels des Kinematik-Katalogs, siehe *Kapitel 5.1* im Anhang, ausgewählt werden. Inhalte des Kinematik-Katalogs sind Typen von kinematischen Ketten mit 3 Freiheitsgraden und deren Arbeitsraumformen, die durch entsprechende Handachsen um weitere 2 bis 3 Freiheitsgrade ergänzt werden.^{21, 22} Große Arbeitsräume werden durch Zufügen weiterer kinematischer Achsen erschlossen, so dass redundante kinematische Ketten mit mehr als 6 Gelenkfreiheitsgraden entstehen, wie z.B. SCARA-Kinematiken oder vertikale Knickarmgeräte auf Linearachsen oder mobilen Plattformen.

In den Steckbriefen wurde an mehreren Stellen von diesen Kombinationsmöglichkeiten Gebrauch gemacht. Als Daumenregeln für die Kinematik-Auslegung gelten:

- Kinematiken auf der Basis rotatorischer Achsen sind zu bevorzugen (Genauigkeit, Abdichtung, besseres Kollisionsvolumen, tendenziell preisgünstiger).
- Bevorzugung handelsüblicher, optimierter Armdesigns (horizontale, vertikale Knickarmkinematiken).
- Modulare Kinematiken können aus Baukastensystemen bestehend aus rotatorischen oder translatorischen Achsmodulen aufgebaut werden.
- Redundante Kinematiken sind steuerungstechnisch aufwändig.
- Bei mobiler Manipulation sind Kinematiken mit rotatorischen Achsen (SCARA, vertikale Knickarmkinematik) aufgrund des geringeren Kollisionsvolumens (im Vergleich mit Linearachsen) vorzuziehen.

- Prinzipiell ist die Anzahl der Achsen zu minimieren. Der Preis einer Kinematik ist nach der Anzahl der Freiheitsgrade weitgehend skalierbar (Daumenregel: 4 bis 5 Tsd Euro pro kinematischer Freiheitsgrad).

Die Nutzung des Kinematik-Katalogs im Anhang ist in Abbildung 2-2.7 dargestellt. Ausgehend von der Wahl der Kinematikstruktur erfolgt die Dimensionierung der kinematischen Kette. Für diese Kinematiksynthese eignen sich sowohl übliche CAD-Programme mit Roboterkinematik-Erweiterungsmodulen oder spezielle Auslegungsprogramme.²³ Der nächstliegende Weg ist sicher, aus dem Angebot marktgängiger Kinematiken passende Manipulatorarme auszuwählen und ggf. zu adaptieren. Ein Alternativweg ist die Konfiguration einer geeigneten Kinematik aus Achsmodulen, wovon ebenso einige Produkte im Komponenten-Katalog aufgelistet sind.

Die Kombination gängiger Armkinematiken und mobiler Plattformen zu typischen Konfigurationen einer mobilen Manipulation, wie in der Studienzielsetzung gefordert, sind ebenso beispielhaft im Kinematik-Katalog dargestellt.

²¹ VDI 2860 Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Achsbezeichnungen.

²² VDI 2861 Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.

²³ Kinematic Synthesis of Robots: <http://synthetica.eng.uci.edu/~mccarthy/Pages/ResProjects.html>.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 3 KONZEPTION DES SERVICEROBOTER-SYSTEMS

Vom Arbeitsraum zur Auswahl der Roboterkinematik

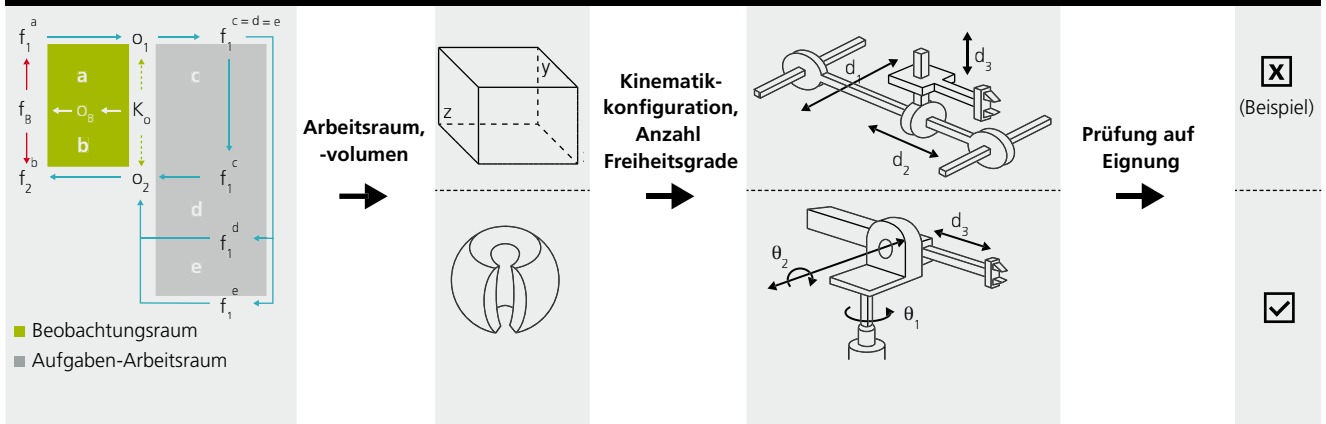


Abb. 2-2.7 Arbeitsraum und Beobachtungsraum, alternative Arbeitsräume bei Roboterkinematiken (siehe Beispiel aus Abbildung 2-2.4).



Hilfsmittel 6: Komponenten-Katalog

Im Sinne geringer Entwicklungskosten und hoher Realisierungssicherheit sollte die Lösungssuche im AD-Verfahren möglichst weit auf bestehende und bewährte Lösungen zurückgreifen. Hierzu bieten sich so genannte Kataloge an, die eine strukturierte Sammlung bekannter und bewährter Lösungen für bestimmte Entwicklungsaufgaben darstellen.

Lösungskataloge sind in der Entwicklung von mechatronischen Systemen verbreitet: Sie dienen der Lösungsanregung oder -übernahme durch systematische Zuordnung bekannter Lösungsmerkmale zu gegebenen Anforderungen FR_i . In ihnen können Wirkprinzipien, prinzipielle Lösungen für komplexe Aufgabenstellungen, Komponenten, etc. gespeichert sein. Entscheidende Bedeutung kommt den ordnenden Gesichtspunkten zu: sie beeinflussen die Handhabbarkeit und den schnellen Zugriff.²⁴

Charakteristisch für die Servicerobotik ist die Integration von

mechatronischen Komponenten zu komplexen, robusten Systemen. Die Kenntnis geeigneter Komponenten und Lösungen ist für den Konstrukteur eine wesentliche Hilfe zur Entwicklung robuster und wirtschaftlicher Systeme. Für die Studienziele ist die Nutzung eines Komponenten-Katalogs ein wichtiges Mittel zum Nachweis der Verfügbarkeit oder beim Fehlen von Schlüsselkomponenten. Weiterhin unterstützen anwendungsübergreifend einsetzbare Komponenten die gewünschten und weiter untersuchten Auswirkungen und Dimensionen von EoS-Effekten.

In [Kapitel 5.2](#) ist ein Beispiel eines Komponenten-Katalogs hinterlegt, der zur Ausarbeitung der Steckbriefe genutzt wurde. Tabelle 2-2.4 gibt den grundsätzlichen Aufbau und die Systematik der Kataloge an. In diesem Zusammenhang ist zu beachten:

- Die Kataloge sind als Idee und Grundstock für eine Lösungssuche im Produktfeld „Serviceroboter“ gedacht. Produktbeispiele im vorliegenden Fall sind ohne Präferenz oder anderweitige Priorisierung gewählt. In zahlreichen Beispielen sind Mitbewerbsprodukte verfügbar.

²⁴ Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre und Band 2: Kataloge. 3. Auflage Berlin: Springer-Verlag, 2001.

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 3 KONZEPTION DES SERVICEROBOTER-SYSTEMS

- Sie sind keinesfalls vollständig und können entsprechend ergänzt bzw. aktualisiert werden. Preise sind geschätzt und ohne Gefahr.
- Abbildungen und Typenbezeichnungen in den Ausführungsbeispielen sind als Illustration zu verstehen; die dazugehörigen Datenangaben können von den Merkmalen der gezeigten Produkte abweichen.
- Die aufgeführten Angaben und Parameterbereiche sind immer unter dem Aspekt der Verwendung der Komponenten in SRS zu sehen.
- Die aufgeführten Kataloge können um weitere Kataloge ergänzt werden: innerhalb und außerhalb des Produktfelds Serviceroboter.²⁴
- Kataloge für Software-Komponenten sind so genannte Repositories, die auch in der SRS-Entwicklung (siehe nachfolgende Steckbriefe) verwendet werden. Die Verwendung dieser Repositories innerhalb dieser Studie ist Inhalt des Kapitel 2.3.1.2.

Zahlreiche mechatronische Komponenten implizieren die Nutzung bestimmter Software-Komponenten, d.h. mechatronische Komponenten und Software-Komponenten sollten in der Lösungsfindung gemeinsam betrachtet werden. Die Darstellung der DPs dieser Kombination von mechatronischen und Software-Komponenten im AD erfolgt folgendermaßen:

- Das ausgewählte bzw. bestimmte Lösungsprinzip wird unterteilt in die Hardware-Komponente, indiziert in Abb. 2-2.8 mittels i.a und die zuordenbare Software-Komponente i.b.
- Das Lösungsprinzip wird in Kombination von HW- und SW-Komponente im Sinne des Informationsaxioms zur Bestimmung der Common Range bewertet.

Kinematiken, Greifer, mobile Plattformen			Sensoren	
Armkinematiken	Greifer	Mobile Plattformen	Sensoren	Taktile Sensoren
Kinematik	Aktuator	Lenkung	Technologie / Reflexion	Erfassungsgroße
Traglast [kg]	Greifkraft [N]	Zuladung [kg]	Dimensionen	Dimensionen
Anzahl Freiheitsgrade [DOF]	Kosten [T€]	Typische Diagonale [m]	Detektion	Charakteristisches Messprinzip
Wiederholgenauigkeit [mm]	Integrierbare Sensoren	Autonome Navigation	Typischer Erfassungsbereich [m]	Messbereich/ Erfassungsbereich
Sensorführung		Kosten [T€]	Genauigkeit	Genauigkeit [%]
Typische Reichweite [m]			Sicherheitsoption	Kosten [€]
Kosten [T€]			typische Messrate [kHz, MHz]	
			Kosten [T€]	

Tab. 2-2.4 Aufbau des Komponenten-Katalogs mit den für die Servicerobotik relevanten Kategorien



01

02

03

04

05

06

07

08

METHODISCHE KONZEPTION VON SERVICEROBOTER-SYSTEMEN AUF BASIS DES AD

→ 4 STRATEGIEN DER VARIANTENBILDUNG

4 Strategien der Variantenbildung

Bei der Entwicklung eines szenariobezogenen Serviceroboters wurden auch mögliche Varianten betrachtet, d.h. für jedes Szenario wurde mindestens ein weiterer alternativer Lösungsentwurf entwickelt, der sich in Details vom ursprünglichen Lösungsentwurf unterscheidet. Im Wesentlichen kamen dabei eine oder mehrere der folgenden Strategien zur Anwendung:

- **Software-Add-Ons.** Zusätzlicher Nutzen durch Software-Funktionen, ohne Hardware zu verändern. Beispiel: Griff in die Kiste-Funktion bei vorhandenem Bildverarbeitungssystem.
- **Adaption des Automatisierungsgrads.** Einschränkung des Autonomiegrads. Beispiel: Funktionsteilung zwischen Maschine und Mensch (sensorische, kognitive Funktionen), also doch noch manuelle Arbeit, verbleibende Personalkosten.
- **Funktionspartitionierung.** zwischen Roboter und Umge-

bung, s. Abb. 2-2.6 links. Beispiel: Verwendung optischer Marker, Transponder (Erkennen von Features, Koordinaten), Akzentuierung der Umgebung (z.B. aktuierte Türen).

- **Technologischer Reifegrad.** Antizipation zukunftsweisender, jedoch noch relativ unreifer Technologien.

Abb. 2-2.8 zeigt die Führung der Varianten des Serviceroboter-Konzepts in der Functional und Physical Domain als separate Bäume, wie auch in [Kapitel 2.1.1](#) kurz beschrieben. Varianten werden unter gewählten Kriterien bewertet, um favorisierte Lösungen anschließend zu detaillieren. Bewertungsmaßstäbe sind idealerweise die Gesamtheit der Erfüllung der FRs, die abgeschätzte Wirtschaftlichkeit der Gesamtlösung sowie weitere Nutzwertfaktoren.

Strategie der Variantenbildung im Axiomatic Design

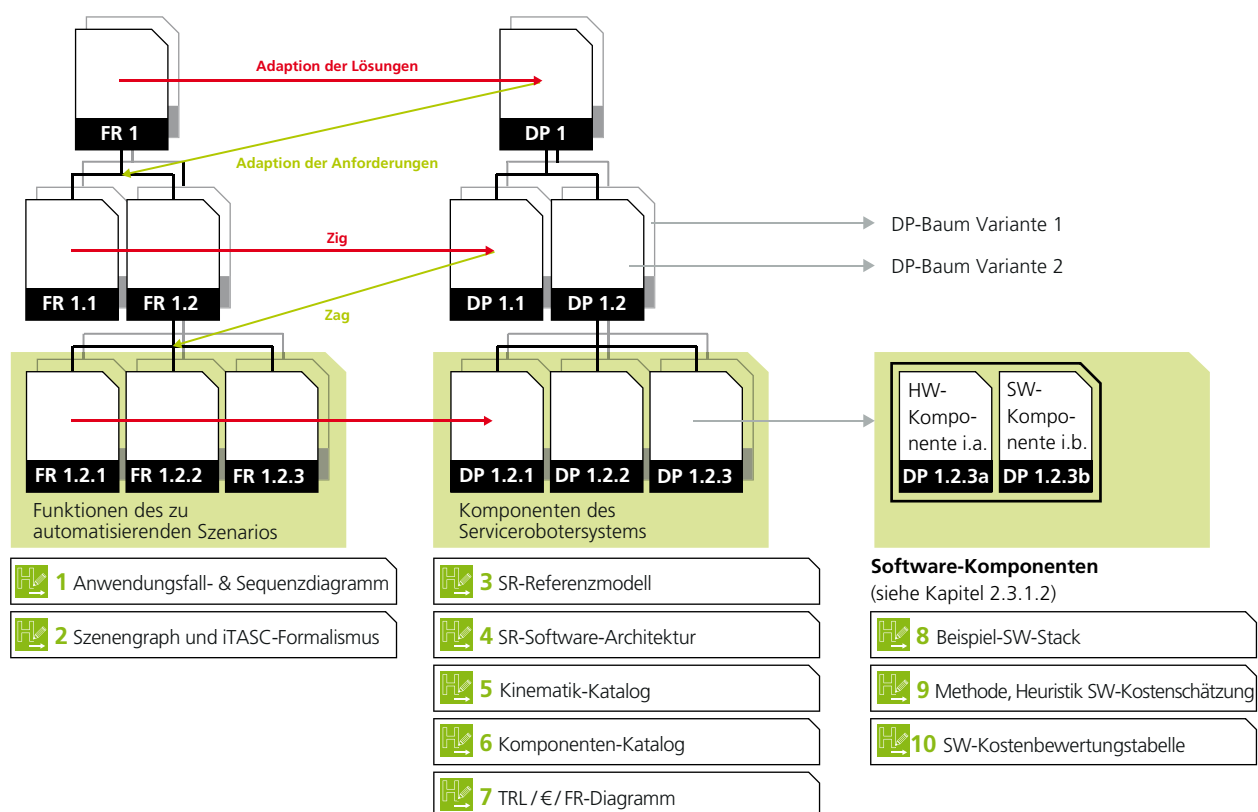


Abb. 2-2.8 Übersicht zur Variantenbildung, zu den eingesetzten Hilfsmitteln und zur Darstellung der Kombination von mechatronischen und Software-Komponenten im Axiomatic Design

SCHÄTZUNG VON KOSTEN UND REIFEGRADEN DER SYSTEMKOMPONENTEN

→ 1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

1 Technology Readiness Level

Um die Einschätzung technologischer Reifegrade eingesetzter Komponenten zu quantifizieren, wurde für die Studie eine Skala verwendet, die an die in der Luft- und Raumfahrt verwendete Taxonomie der Technology Readiness Levels angelehnt ist.²⁵ Die verwendete Skala ist in Tabelle 2-3.1 dargestellt. Je höher der TRL, desto näher ist die Komponente an der Serienreife (TRL9). Alle in den Serviceroboter-Szenarien angegebenen TRL basieren auf Experteneinschätzungen.

TRL	Bedeutung ²⁵
1	Grundsätzliche Prinzipien beschrieben und dokumentiert
2	Technologisches Konzept und / oder Anwendung formuliert
3	Analytischer und experimenteller Machbarkeitsnachweis erbracht
4	Komponenten- / Teilsystemvalidierung in Laborumgebung
5	System- / Teilsystem- / Komponentvalidierung in repräsentativer Umgebung
6	Modell oder Prototypendemonstration des Systems/von Teilsystemen in repräsentativer Umgebung
7	Prototypendemonstration des Systems in Arbeitsumgebung
8	Einsatzfähigkeit des vollständigen Systems in Tests nachgewiesen
9	Einsatzfähigkeit des vollständigen Systems im Alltagseinsatz nachgewiesen

Tab. 2-3.1 Stufung der Technological Readiness Levels (TRL)

1.1 Hardware-Kosten

Die benötigten Hardware-Komponenten gehen aus dem Axiomatic Design der vorgeschlagenen Lösung hervor, im Wesentlichen sind dies die Blätter des Design-Parameter-Baumes, die physische Bestandteile des vorgeschlagenen Roboters repräsentieren. Bei der Schätzung von Hardware-Kosten ist zwischen bereits existierenden Komponenten und solchen, die erst noch entwickelt werden müssen, zu unterscheiden.



Hilfsmittel 7: TRL/€/FR-Diagramm

Komponenten, die bereits existieren, lassen sich nochmals in kommerziell verfügbare und prototypische untergliedern. Für erstere gestaltet sich die Kostenschätzung am einfachsten, hier genügt meist eine Anfrage für ein Angebot beim Hersteller. Zu beachten ist, dass es für viele solcher Komponenten keine festen Listenpreise oder unverbindliche Preisempfehlungen gibt, häufig hängt der konkrete Endpreis von der Verhandlungsmacht des Käufers ab. Die Preise prototypischer Komponenten unterliegen tendenziell höheren Unsicherheiten.

Tabelle 2-2.3 zeigt das FR-DP-Schema des Axiomatic Designs, das ausgehend von der Vereinfachung in Abbildung 2-1.5 um zwei weitere Achsen bzw. Parameter erweitert wird:

- Die TRL-Skala (1 bis 9), die den geschätzten Reifegrad des gewählten Lösungsprinzips angibt
- Den geschätzten Preis der Komponente.

Diese TRL/€/FR-Diagramme sind hiermit für ein Lösungsprinzip eine kompakte Darstellung in Bezug auf geforderte Funktionserfüllung, Preis und Verfügbarkeit.

²⁵ Siehe bspw. http://esto.nasa.gov/files/TRL_definitions.pdf

SCHÄTZUNG VON KOSTEN UND REIFEGRADEN DER SYSTEMKOMPONENTEN

→ 1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

Die Erweiterung des AD-Schemas für Preis- und TRL-Charakterisierung von Lösungsprinzipien

Für kritische Funktionen/Komponenten (Beispiel)

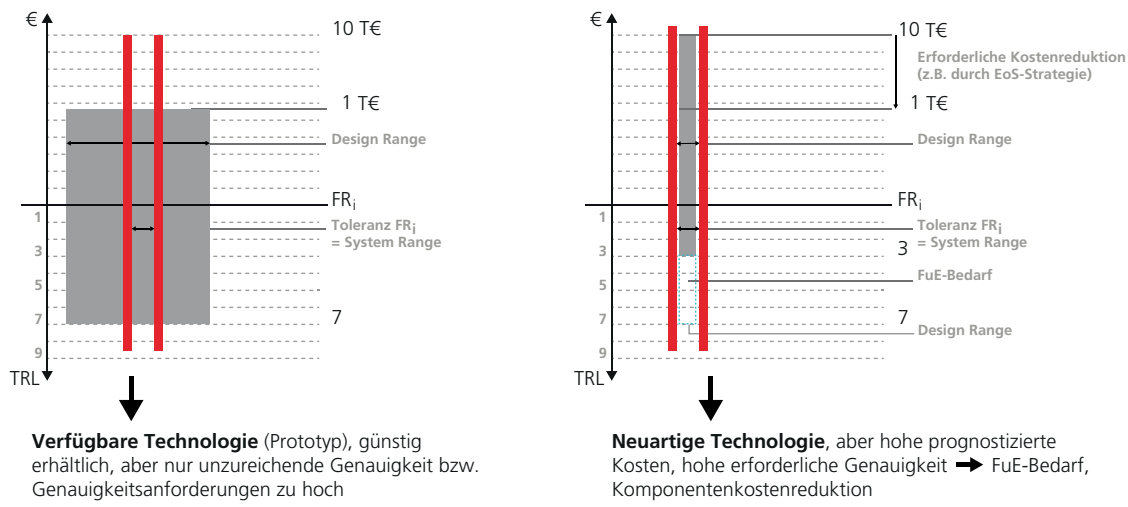


Abb. 2-3.1 Darstellung der TRL/€/FR-Diagramme in EFFIROB.

Um die Kostenschätzung in den Szenariensteckbriefen zu vereinheitlichen, wurden Preise für die häufigsten Komponenten basierend auf Expertenwissen im Komponenten-Katalog (Kapitel 5.2) angegeben, für den einzelnen Anwender können diese jedoch aus oben genannten Gründen deutlich abweichen. Für Komponenten, die erst noch zu entwickeln sind, wird eine Expertenschätzung basierend auf Expertenwissen oder Erfahrungswerten in der Servicerobotik vorgenommen.

1.2 Abschätzung von Software-Entwicklungskosten

Ähnlich wie die Hardware-Komponenten lassen sich die benötigten Software-Komponenten aus den software-spezifischen Designparametern des Axiomatic Designs ablesen. Mit dem Wissen über den Software-Bedarf gilt es zu prüfen, welche Bestandteile bereits als Open Source oder kommerziell erhältlich und für welche Eigenentwicklungen notwendig sind. Im Unterschied zu den Hardware-Komponenten fällt der Entwicklungsaufwand allerdings nur einmalig und nicht pro Roboter an, da sich Software als immaterielles Gut unter vernachlässigbaren Kosten vervielfältigen lässt.

Um den Aufwand einer solchen Recherche überschaubar zu halten und eine systematische Vorgehensweise zu gewährleisten, wurde im Rahmen der vorliegenden Studie eine vereinfachende Methode zur Software-Kostenschätzung entwickelt, die für jede Software-Komponente eine von vier Möglichkeiten vorsieht:

- Sie wird als kommerzielle Lizenz angeboten.
- Die benötigte SW-Komponente wird mit einer Hardware-Komponente mitgeliefert.
- Die benötigte SW-Komponente ist als Open Source verfügbar.
- Die benötigte SW-Komponente muss erst erstellt werden.

Die Möglichkeit, dass eine Komponente als kommerzielle, separate Closed-Source-Software verfügbar ist, wurde aus zwei Gründen vernachlässigt. Zum einen senkt Open Source gerade für Unternehmen mit stark beschränktem Entwicklungsbudget die Einstiegsbarrieren in den Markt der Servicerobotik, da bereits erarbeitetes Wissen, Erfahrungen und Software der Servicerobotik-Community frei verfügbar sind. Zum anderen ist der Suchaufwand für derartige Closed-Source-Software in



SCHÄTZUNG VON KOSTEN UND REIFEGRADEN DER SYSTEMKOMPONENTEN

→ 1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

einem unstrukturierten Markt, wie dem der Servicerobotik, unverhältnismäßig hoch: Nach Kenntnisstand der Autoren existiert keine standardisierte, kommerzielle Software, die getrennt von Hardware-Komponenten erwerbbar wäre, so dass lediglich über Einzelanfragen und -verhandlungen bei ebenfalls zu recherchierenden Software-Entwicklungsunternehmen eine Aussage über Kosten der Software-Komponenten erhältlich wären. Zudem unterlägen selbst derartige Kostenaussagen Schätzungenauigkeiten (in Abhängigkeit der Kostenschätzungsmethode des jeweiligen kommerziellen Software-Entwicklers).

Generell ist zu bedenken, dass Schätzungen für den Aufwand von Software-Entwicklungen zwangsweise mit hohen Unsicherheiten behaftet sind und die so ermittelten Kosten daher nur Orientierungswerte sein können.²⁶

1. Fall: Software-Komponente als Hardwarezubehör.

Der Preis für die Software ist bereits im Kaufpreis der Hardware enthalten, es fallen lediglich Integrationskosten im Rahmen der Personenaufwände wie im Hardware-Katalog angegeben an.

2. Fall: Software-Komponente als Open Source verfügbar.

Da die Prüfung, ob eine Software-Komponente als Open Source zur Verfügung steht, ähnlich komplex sein kann wie für proprietäre Software, wird folgende Methodik zur Vereinfachung und Vereinheitlichung verwendet: Anhand einer Tabelle, die derzeit verfügbaren Software-Komponenten und deren grobe funktionale Zuordnungen auflistet, werden die benötigten Bestandteile ausgewählt. Tabelle 2-3.2 bildet alle relevanten Komponenten²⁷ des Robotik-Frameworks ROS (kurz für Robot Operating System) ab.²⁸ Dieses Framework wurde als repräsentativ für den aktuellen Stand der Robotiksoftware gewählt, da es laut Expertenaussage als das derzeit umfangreichste und weitverbreitetste gilt. Diese Annahme stellt eine Vereinfachung dar, die allerdings notwendig erscheint, um exorbitante Recherchekosten zu vermeiden.²⁹

²⁷ In der Terminologie von ROS werden diese Software-Pakete als ‚Stacks‘ bezeichnet.

²⁸ Stand 09.06.2010. Nicht betrachtet wurden Stacks, die nur für einen spezifischen Roboter (z.B. Care-O-bot) verwendet werden können. S. <http://www.ros.org/wiki/StackList>, diese Liste wird regelmäßig aktualisiert.

²⁹ Es existiert eine Vielzahl an Open Source Robotikframeworks, u.a. Player / Stage, Carmen, Clarity, MCA2, OROCOS, RT-Middleware u.v.m.; siehe auch Kramer, J.: Development environments for autonomous mobile robots: A survey. In: Autonomous Robots, 2007, Volume 22, Number 2, pp. 101–132. Manche dieser Frameworks enthalten hauptsächlich Regelungsalgorithmen, andere zielen eher auf Verbindung von Roboterkomponenten ab. Die unterschiedlichen Auffassungen, Ausstattungen und Definitionen eines Robotikframeworks erschweren die Vergleichbarkeit untereinander.

²⁶ Zum Thema Schätzungenauigkeit s. bspw. McConnell, S.: Software Estimation: Demystifying the Black Art. Redmond: Microsoft Press, 2006.

SCHÄTZUNG VON KOSTEN UND REIFEGRADEN DER SYSTEMKOMPONENTEN

→ 1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL



Hilfsmittel 8: ROS Software-Stack

Bezeichnung	Funktionen							
	extrovertiert				introvertiert			
Komponente	Navigation	Manipulation	Wahrnehmung	Kommunikation	Modellierung	Planung	Lernen	Entwicklung
ROS-Stack								
arm_navigation		•				•		
arm_planning_control		•				•		
articulation	•	•			•	•		
camera_drivers			•					•
camera_umd			•	•				
collision_environment	•		•					
common	•	•	•	•	•	•	•	•
common_msgs	•	•	•		•			•
communication				•				
cram					•	•	•	
diagnostics								•
driver_common								•
executive_python								•
exploration	•		•		•	•		
geometry					•	•		•
gps_umd	•			•				
image_common			•					•
image_pipeline			•		•	•		
image_transport_plugins			•	•				•
imu_drivers			•					
joystick_drivers	•							
kinematics					•	•		
laser_drivers			•					•
laser_pipeline					•	•		
machine_learning							•	
manipulation_common		•						
motion_planners	•	•				•		
motion_planning_common	•	•				•		

>>

SCHÄTZUNG VON KOSTEN UND REIFEGRADEN DER SYSTEMKOMPONENTEN

→ 1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

Bezeichnung	Funktionen							
	extrovertiert				introvertiert			
Komponente	Navigation	Manipulation	Wahrnehmung	Kommunikation	Modellierung	Planung	Lernen	Entwicklung
ROS-Stack								
motion_planning_environment	•		•			•		
motion_planning_visualization				•				
navigation	•							
octomap_mapping					•			
physics_ode					•	•		
point_cloud_perception			•					
power_supplies								•
robot_calibration								•
robot_model					•			
ros	•	•	•	•	•	•	•	•
ros_realtime								•
scan_tools			•					
simulator_gazebo					•			•
simulator_stage					•			•
slam_gmapping					•		•	
sound_drivers				•				
topological_navigation	•					•		
trajectory_filters	•	•				•		
vision			•					
vision_opencv			•					
visual_feature_detectors			•					
visualization				•				•
visualization_common								•
vslam					•		•	
web_interface				•				
wifi_drivers				•				

Tab. 2-3.2 Open Source Software-Komponenten (ROS)

SCHÄTZUNG VON KOSTEN UND REIFEGRADEN DER SYSTEMKOMPONENTEN

→ 1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

Da diese Software noch nicht an den spezifischen Roboter angepasst ist, muss der Aufwand der Anpassung abgeschätzt werden. Hierfür bedient sich die verwendete Methodik der so genannten Function-Point-Metrik. Function Points ermöglichen die von einer Programmiersprache unabhängige Aufwandsabschätzung bzw. -bewertung von Software.³⁰ Zu diesem Zweck wurde der Quellcode sämtlicher Software-Pakete in Abbildung 2-3.2 auf deren Menge an Function Points hin untersucht. Tabelle 2-2.3 zeigt die Function Points einiger Software-Komponenten (auch als „Stacks“ bezeichnet).

Die vollständige Tabelle ist in Kapitel 5.3 des Anhangs wiedergegeben.

ROS-Stack	...	Function Points
...
topological_navigation	...	79
trajectory_filters	...	177
vision	...	360
vision_opencv	...	36
...

Tab. 2-2.3 Function Points einiger ROS-Stacks

 **Hilfsmittel 9: Methode und Heuristik zur Software-Kostenschätzung**

Da diese Software-Komponenten üblicherweise noch an den Roboter, auf dem sie zur Anwendung kommen sollen, angepasst und integriert werden müssen, wird für die Ermittlung der Software-Entwicklungskosten bei den Szenariensteckbriefen von einem Verhältnis von Wiederverwendung bestehender Komponenten zu Eigenentwicklung von 60:40 ausgegangen, d.h. 40% der jeweiligen Function Points sind neu zu erstellen

³⁰ Beispiel: Bundschuh, M.; Fabry, A.: Aufwandschätzung von IT-Projekten. Frechen: MITP Verlag, 2004. Eine detaillierte Darstellung bietet z.B. Brown, B. et. al.: Function Point Counting Practices Manual Release 4.3.1. Princeton Junction, USA IFPUG 2010. www.ifpug.org

oder bedürfen intensiver Bearbeitung.³¹ Typische Bearbeitungsraten sind 10 Function Points pro Personenmonat für die Eigenentwicklung und 30 Function Points pro Personenmonat für die Auswahl und Anpassung der bestehenden Anteile.³² Somit ergibt sich in dieser vereinfachten Form der Kostenabschätzung die Formel:

$$\text{Entwicklungskosten} = \left(\frac{0,4}{10} + \frac{0,6}{30} \right)$$

$$* \text{Personenmonatskosten} * \sum \text{Function Points} \\ = 0,06 * \text{Personenmonatskosten} * \sum \text{Function Points}$$

Die genannten Werte umfassen Kosten über den gesamten Entwicklungsprozess, von der Analyse der Software-Anforderungen bis hin zu Qualitätssicherung und Fehlerbeseitigung, daher fallen die Ergebnisse obiger Formel im Vergleich zu den Hardware-Kosten tendenziell hoch aus.

Für die Rechnungen in den Szenariensteckbriefen der vorliegenden Studie wurden die Kosten für einen Entwicklermonat mit 10 Tsd Euro angesetzt. Diese enthalten neben den Lohn noch einen deutlichen Aufschlag an Nebenkosten.³³

3. Fall: Eigenentwicklung der Software-Komponente.

Für den Fall, dass benötigte Software-Komponenten noch nicht existieren und daher erst entwickelt werden müssen, ist die Aufwandschätzung am schwierigsten. Lässt sich der ungefähre Aufwand in Function Points mittels Vergleich mit existierenden Software-Komponenten herleiten, so kann man

³¹ Dieses Verhältnis ist für komponenten-basierte Software-Entwicklung typisch, kann aber in Abhängigkeit von vielen Parametern stark abweichen. Siehe Jones, C.: Estimating Software Costs: Bringing Realism to Estimating. New York: McGraw-Hill, 2007, Kap. 6 und 7. Sofern Branchen- oder unternehmensspezifische Werte und / oder Heuristiken vorliegen, sollten im Zweifelsfalle diese den hier dargestellten, relativ abstrakten Kennzahlen vorgezogen werden.

³² Jones, C. ebenda.

³³ Laut <http://www.gehaltsvergleich.com/gehalt/Software-Entwickler-Software-Entwicklerin.html> beträgt das durchschnittl. Monatsgehalt eines Software-Entwicklers in Deutschland bei 39 Wochenstunden Euro 3 579.

SCHÄTZUNG VON KOSTEN UND REIFEGRADEN DER SYSTEMKOMPONENTEN

→ 1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

bei einer Produktionsrate von 6 Function Points pro Personenmonat³⁴ die Kosten für diese Komponenten mit der Formel

$$\begin{aligned} \text{Entwicklungskosten} &= \frac{1}{6} * \text{Personenmonatskosten} \\ &* \sum \text{Function Points} \\ &= 0,167 * \text{Personenmonatskosten} * \sum \text{Function Points.} \end{aligned}$$

abschätzen (analogiebasierte Schätzung). Ist diese Vergleichsmöglichkeit jedoch nicht gegeben, so ist nur eine sehr grobe Expertenschätzung basierend auf allgemeinen Erfahrungen in der Servicerobotik möglich. Abbildung 2-3.2 visualisiert die Software-Entwicklungskostenschätzung für Serviceroboter-Systeme.

Die geschätzten Gesamtentwicklungskosten für Software sind gleich der Summe aller geschätzten Entwicklungskosten für Software-Komponenten.



Hilfsmittel 10: Software-Kostenbewertungstabelle

Diese Tabelle ist in Kapitel 5.3 zu finden.

Abschätzen von Software-Entwicklungskosten für Serviceroboter-Systeme

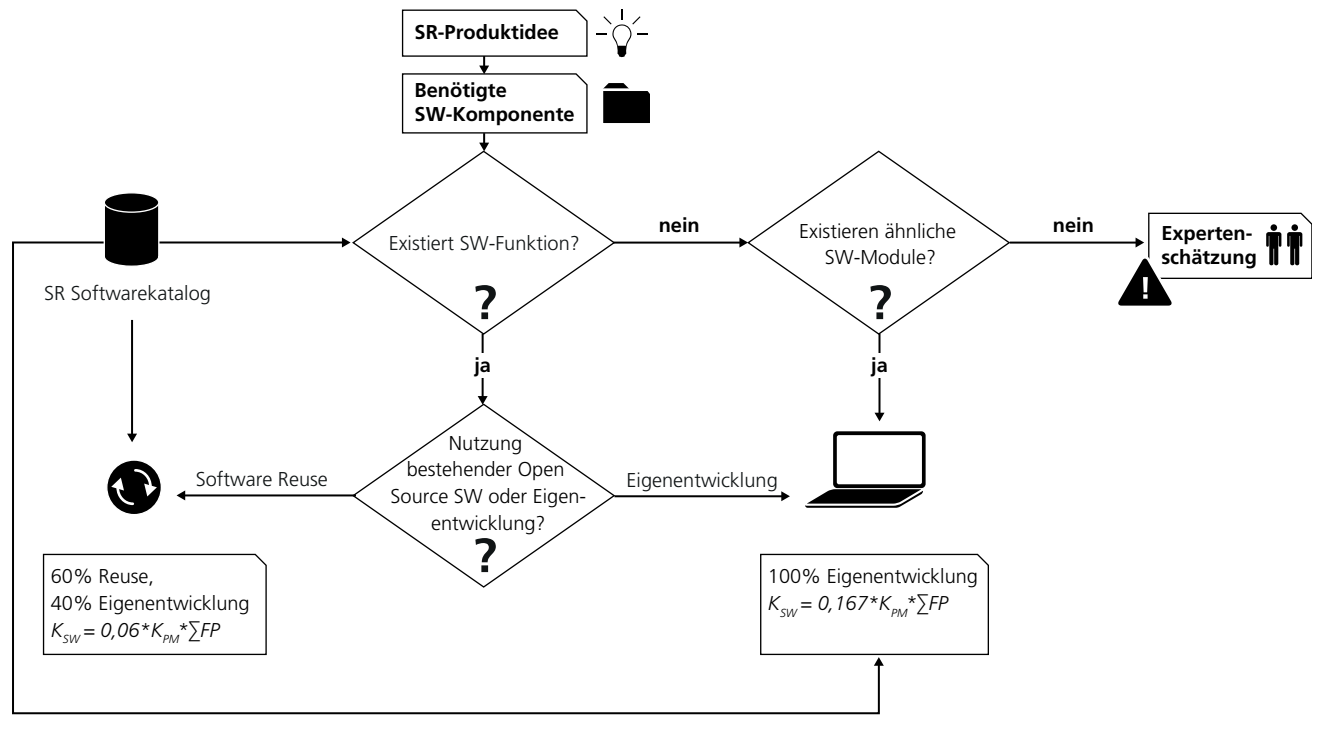


Abb. 2-3.2 Methodik der Software-Kostenschätzung mittels Hilfsmittel 9.

³⁴ Typische Produktionsrate bei komponenten-basierter Entwicklung. Siehe Jones, C., Kap. 7.



ERHEBUNG DER LIFE CYCLE COSTS DURCH INFORMATIONSGESPRÄCHE UND VORORTAUFNAHMEN

→ 1 INTERVIEWS

1 Interviews

Ausgangspunkte für die Bearbeitung eines Szenarios sind Interviews mit geeigneten Ansprechpartnern der entsprechenden Branche, in denen Fragen zu technischen und wirtschaftlichen Aspekten geklärt werden. Um ein möglichst umfassendes Verständnis für ein Serviceroboter-Szenario zu erhalten, werden drei Formen von Gesprächen durchgeführt:

- Informationsgespräch
- Anwendergespräch
- Herstellergespräch

Ziel der Gespräche ist nicht die Sammlung statistisch repräsentativer Aussagen, sondern vielmehr eine erste Orientierung im jeweiligen Anwendungsfeld. Die Gesprächsleitfäden zu den drei Gesprächstypen befinden sich im Anhang, [Kapitel 5.6](#).

1.1 Informationsgespräche

Für jeden Zielmarkt wird ein geeigneter Ansprechpartner bestimmt, Hauptkriterium für die Auswahl ist die nachweisliche Expertise, z.B. Lehrauftrag für das Fachgebiet an einer Hochschule, Tätigkeit in beratenden / unterstützenden Organen des Fachgebiets, langjährige Berufserfahrung und / oder leitende Position im Fachgebiet.

Interviews in EFFIROB

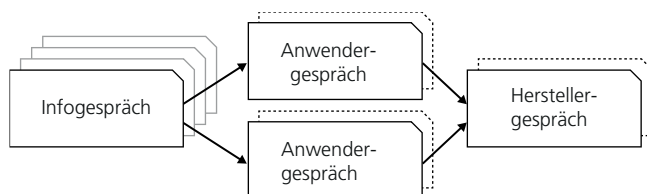


Abb. 2-4.1 Interviews in den ausgewählten Zielmärkten.

In Informationsgesprächen werden allgemeine, offene Fragen zur Wirtschaftslage und derzeitige ungelöste Probleme der Branche diskutiert. Ziel des Interviews ist die Identifikation einer konkreten Anwendung, die für den Einsatz autonomer, mobiler Roboter in Frage kommt.

Im Rahmen dieser Studie wurde pro Serviceroboter-Szenario ein Informationsgespräch geführt.

1.2 Anwendergespräche

Nach Auswertung des Informationsgesprächs werden Anwendergespräche geführt. Anwender im Sinne der Studie sind derzeitige oder zukünftige Nutzer aktueller Technologien zur Aufgabenbewältigung im betrachteten Tätigkeitsfeld.

Ziele dieser Interviews sind die Vertiefung der Kenntnisse über die betriebswirtschaftliche Situation des Anwenders, die Identifikation zentraler Probleme technischer Art sowie der Status quo des Robotereinsatzes beim Anwender.

Im Rahmen dieser Studie wurden pro Serviceroboter-Szenario typischerweise zwei Anwendergespräche geführt.

1.3 Herstellergespräche

Hersteller im Sinne dieser Studie sind Produzenten und Ausstatter technischer Lösungen für die Bearbeitung des betrachteten Anwendungsfeldes. Die Anwender sind Kunden der Hersteller.

Die Zielstellungen sind die betriebswirtschaftliche und technische Einschätzung einer Robotiklösung seitens des Herstellers, die Identifikation zentraler Probleme sowie Feststellung des Status quo des Robotereinsatzes beim Anwender. Somit dient das Herstellergespräch nicht nur der Erlangung neuer Informationen, sondern auch der Überprüfung der Anwenderauskünfte.

Im Rahmen dieser Studie wurde pro Serviceroboter-Szenario ein bis zwei Herstellergespräche geführt.



MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 1 MARKTPOTENZIALE: LIFE CYCLE COSTING, LCC-TOOL UND MARKTSTRUKTURANALYSE

1 Marktpotenziale: Life Cycle Costing, LCC-Tool und Marktstrukturanalyse

Ein Ziel dieser Studie ist nicht nur die Konzeption neuartiger Serviceroboter-Konzepte in verschiedensten Zielmärkten, sondern insbesondere auch die Beurteilung der damit verbundenen Marktpotenziale. Das für den Verbreitungsgrad eines konkreten Serviceroboter-Konzepts entscheidende Element ist dabei neben der grundsätzlichen Existenz einer geeigneten Zielgruppe (= Markt) insbesondere der Nutzen, den das Serviceroboter-Konzept für einen potenziellen Anwender stiftet – und zwar situationsspezifisch und ganzheitlich vor dem Hintergrund eines konkreten Anwendungsszenarios. Erst auf dieser Grundlage können abschließend Aussagen über die Ausnutzung eines eventuell vorhandenen Marktpotenzials getroffen werden. Folglich bedingt eine Abschätzung des Marktpotenzials zunächst die betriebswirtschaftliche Bewertung des Nutzens eines Serviceroboter-Konzepts aus der Perspektive eines potenziellen Anwenders. Abbildung 2-5.1 skizziert auf dieser Grundlage den für diese Studie relevanten Prozess zur Abschätzung der Marktpotenziale.

Obwohl gerade in den hier betrachteten Zielmärkten insbesondere auch qualitative Faktoren von großem Interesse sind, wie z.B. die sich ergebenden Entlastungspotenziale der Mitarbeiter oder potenzielle Produktivitätsfortschritte, so ist letztlich in allen Anwendungsfällen die monetäre Vorteilhaftigkeit eines Serviceroboter-Konzepts im Vergleich zum Status quo entscheidend.

Im Zentrum der folgenden Abschnitte steht daher die Vorstellung einer diesbezüglich geeigneten Methode, deren Kern eine ganzheitliche, den gesamten Lebenszyklus umfassende Betrachtungsweise ist und die daher auf dem Ansatz des Life Cycle Costing (LCC) basiert ([Kapitel 2.5.2](#) und [Kapitel 2.5.3](#)). Gleichzeitig stellt dieser Abschnitt mit dem LCC-Tool für Serviceroboter (sog. SR-LCC-Tool) ein entsprechendes Instrument vor, das den mit der hier vorgestellten Methode verbundenen Prozess instrumentell unterstützt ([Kapitel 2.5.4](#)) – nicht nur um die Praxistauglichkeit des Verfahrens zu zeigen, sondern insbesondere auch um die individuelle Anwendung der Methode für die Fachwelt zu unterstützen.

Abschließend wird noch erläutert, wie auf dieser Grundlage und basierend auf einer geeigneten Marktstrukturanalyse schließlich die für die jeweiligen Serviceroboter-Konzepte relevanten Marktpotenziale abgeschätzt werden können ([Kapitel 2.6](#)).

MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 1 MARKTPOTENZIALE: LIFE CYCLE COSTING, LCC-TOOL UND MARKTSTRUKTURANALYSE

Marktpotenziale: Life Cycle Costing, LCC-Tool und Marktstrukturanalyse

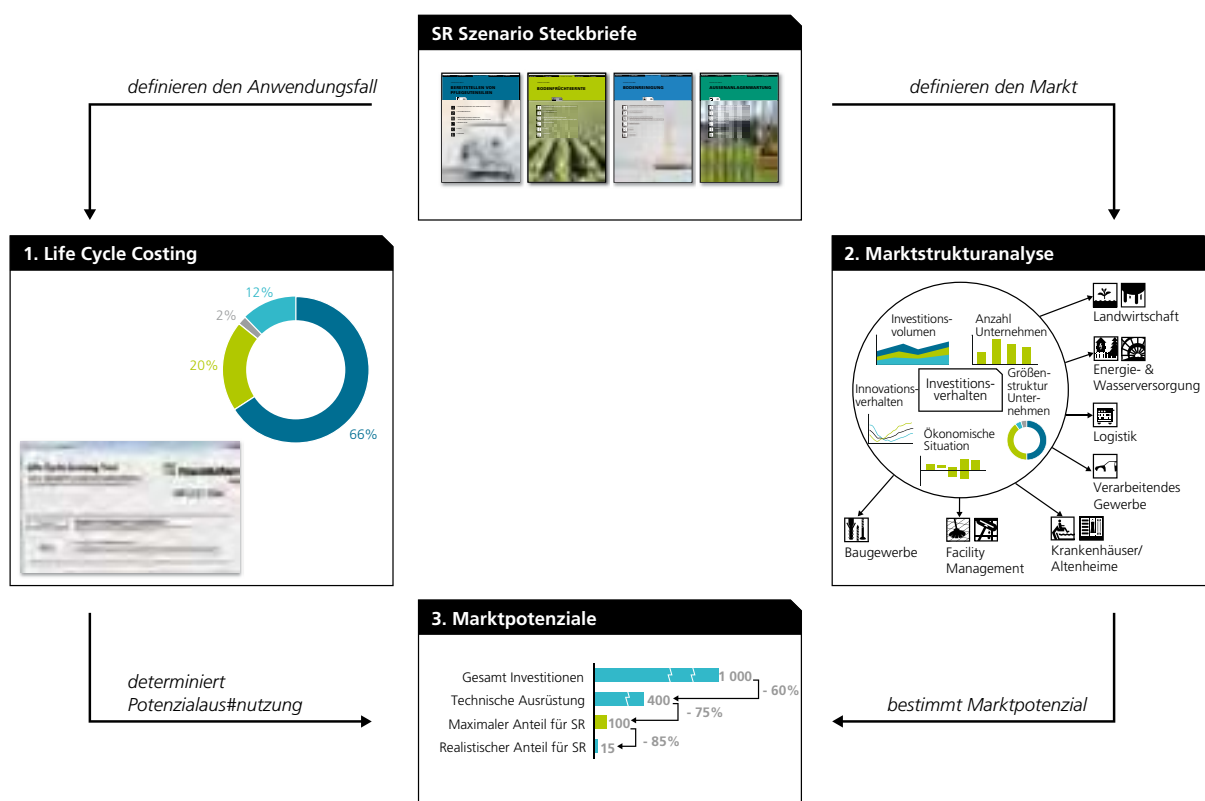


Abb. 2-5.1 Abschätzung der Marktpotenziale: Prozessmodell



MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 2 LIFE CYCLE COSTING: METHODISCHE HINTERGRÜNDE

2 Life Cycle Costing: Methodische Hintergründe

Im Zentrum des hier vorliegenden Bewertungsproblems steht der Vergleich zweier Alternativen der Leistungserbringung, nämlich einer konventionellen und einer mit Serviceroboter-Einsatz, die allerdings in 11 unterschiedlichen Anwendungskontexten miteinander verglichen werden.

Da Serviceroboter in der Regel langlebige Investitionsgüter sind, handelt es sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht hier grundsätzlich um eine klassische Investitionsentscheidung, bei der die (monetären) Konsequenzen der Alternativen auf Basis einer mehrperiodigen Betrachtung miteinander verglichen werden.³⁵ Die Alternativen sind also prinzipiell auf Basis ihres Lebenszyklus zu bewerten. Zwei miteinander verwandte und immer öfter eingesetzte Konzepte, die diesen Ansatz zur Bewertung von Investitionsprojekten aufgreifen, sind das Life Cycle Costing (LCC) bzw. so genannte Total Cost of Ownership (TCO) Betrachtungen.³⁶

Beiden Konzepten liegt die Erkenntnis zugrunde, dass ein vergleichsweise großer Anteil entscheidungsrelevanter Kosten nicht alleine mit der Anschaffung eines Investitionsobjekts verbunden ist, sondern insbesondere während des Betriebes bzw. mit dem Erhalt der Betriebsbereitschaft – im Sinne von Energie- und Wartungs- bzw. Instandhaltungskosten – anfällt sowie auch im Rahmen der Entsorgung entstehen kann. Ein Anteil der Anschaffungskosten von gerade $\frac{1}{4}$ der Lebenszykluskosten kann dabei durchaus als typischer Wert betrachtet werden. Ansätze, die alleine den Anschaffungszeitpunkt berücksichtigen, greifen daher zu kurz.³⁷ Der wesentliche Unterschied zwischen LCC und TCO ist dabei durch ihr Erkennt-

nisinteresse begründet:³⁸ Beide werden als Instrumente des strategischen Kostenmanagements bezeichnet, doch während eine LCC-Betrachtung stets allgemein versucht, sämtliche Kosten, die während des Lebenszyklus eines Investitionsobjekts anfallen, zu erfassen, so wird eine TCO-Analyse stets spezifisch aus der Sicht des Anwenders des Investitionsobjekts („owner“) durchgeführt, d.h. sie umfasst nur die für ihn relevanten Kosten. Dabei wird allerdings eine LCC-Analyse häufig als notwendiges Instrument zur Erfassung der TCO betrachtet.

Die analytische Zielsetzung derartiger Kostenbetrachtungen ist dabei jedoch immer ähnlich, und zwar durch die ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus bessere Aussagen bzgl. möglicher Hebel zur Optimierung der Gesamthöhe der Lebenszykluskosten und / oder ihrer Verteilung zwischen Hersteller und Anwender zu treffen (vgl. Abbildung 2-5.2). Gerade aus der Perspektive eines Herstellers angewendet, zielen lebenszyklusorientierte Ansätze darauf ab, Wettbewerbsvorteile nicht nur durch die Reduktion der Anschaffungskosten, sondern insbesondere aufgrund der geringeren Gesamtkosten für den Kunden zu erzielen (Übergang vom Kosten- zum Nutzenwettbewerb).^{39, 40} Demnach ist die Trennung zwischen den verwendeten Begriffen eher formal als praktisch relevant – gerade in Bezug auf LCC und TCO ist festzustellen, dass beide Ansätze eine vollständige Analyse der Lebenszykluskosten bedingen. Im Folgenden wird daher LCC als Synonym für derartige, den ganzen Lebenszyklus umfassende Ansätze zur Kostenanalyse verwendet.

³⁵ Vgl. Weber, J.: *Einführung in das Controlling*. 9. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag 2002.

³⁶ Vgl. Geißdörfer, K.: *Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC) – Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA*. In: Gleich, R.; Wald, A. (Hrsg.): *Controlling und Management*. Band 7. Berlin: LIT Verlag, 2008.

³⁷ Vgl. Zeibig, S.: *Total Cost of Ownership*. In: *Controlling* 17 (2005) Nr. 11, S. 691–692.

³⁸ Vgl. im Folgenden: Geißdörfer, K.: *Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC): Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA*. Berlin: LIT Verlag, 2008.

³⁹ Vgl. Noske, H.: *Billig kann teuer sein – TCO im Einkauf und in der Entwicklung von Investitionsgütern*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2007) Nr. 5, S. 316–319.

⁴⁰ Vgl. Heilala, J.; Helin, K.; Montonen, J.: *Total cost of ownership analysis for modular final assembly systems*. In: *International Journal of Production Research* 44 (2006) Nr. 18–19, S. 3967–3988.



MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 2 LIFE CYCLE COSTING: METHODISCHE HINTERGRÜNDE

Investitionsentscheidung auf Basis der LCC

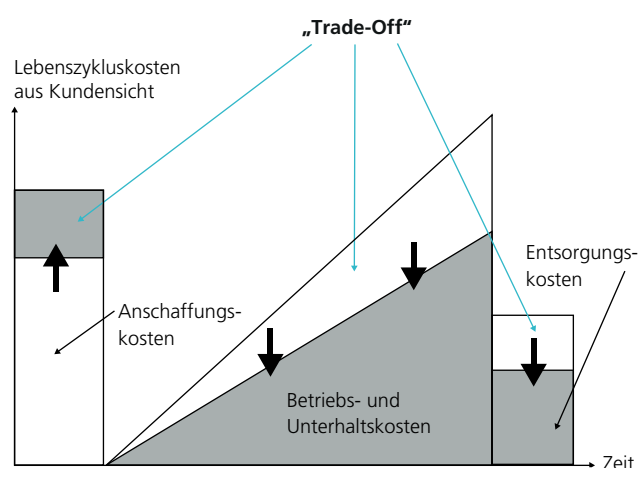


Abb. 2-5.2: Investitionsentscheidung auf Basis der LCC als Trade-Off zwischen unterschiedlichen Lebenszykluskostenarten.⁴¹

Zusammenfassend lässt sich zur Anwendung von LCC im Rahmen dieser Studie daher Folgendes festhalten:

- LCC zielt darauf ab, die Gesamtkosten, die mit Besitz und Nutzung von Maschinen und Equipment verbunden sind, zu bewerten.⁴²
- Durch diesen Bewertungsansatz liefert LCC eine solide Basis, um unterschiedliche (Investitions-) Alternativen zu vergleichen.⁴³
- Konsequenterweise ermöglicht dies bessere Entscheidungen, da nicht nur Anfangsinvestitionen betrachtet werden, sondern auch alle weiteren zukünftigen Kosten über den erwartbaren Nutzungszeitraum.⁴⁴
- Die Methodik kann sowohl auf materielle (z.B. Kapital- oder Anlagegüter) als auch auf immaterielle Anlagenwerte (z.B. industrielle Dienstleistungen) angewendet werden, was einen Einsatz für die aufgeführte Problemstellung ermöglicht.

Somit erleichtert LCC nicht nur die Wahl zwischen den beiden Alternativen konventionelle Leistungserbringung und Serviceroboter-Einsatz, sondern kann auch Hinweise auf neue Geschäftsmodelle liefern.⁴⁵

⁴¹ Vgl. Taylor, W. B.: *The use of life cycle costing in acquiring physical assets*. In: *Long Range Planning*, 14 (1981), Nr. 6, S. 32–43.

⁴² Vgl. Fabrycky, W. J.; Blanchard, B. S.: *Life-Cycle cost and economic analysis*. Englewood Cliffs, N. J. (New Jersey): Prentice-Hall, 1991.

⁴³ Vgl. Asiedu, Y.; Gu, P.: *Product life cycle cost analysis: state of the art review*. In: *International Journal of Production Research*, 36 (1998) Nr. 4, S. 883–908.

⁴⁴ Vgl. Jackson, D. W.; Ostrom, L. L.: *Life Cycle Costing in Industrial Purchasing*. In: *Journal of Purchasing & Materials Management*, 16 (1980) Nr. 4, S. 8–12.

⁴⁵ Vgl. Weißfloch, U. et al.: *Produktionskostensenkung durch LCC-Konzepte*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 105 (2010) Nr. 9, S. 791–795.

MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 3 METHODIK

3 Methodik

Die LCC-Betrachtung bildet nur den konzeptionellen Kern der hier entwickelten Methode zur betriebswirtschaftlichen Bewertung der zuvor abgeleiteten Serviceroboter-Konzepte. Tatsächlich werden die Serviceroboter-Szenarien nach dem in Abbildung 2-5.3 dargestellten und im Folgenden erläuterten Prozess bewertet:

Schritt 1: „LCC-Analyse“

Aufgrund der den ganzen Lebenszyklus umfassenden Betrachtungsperspektive kann eine LCC-Analyse nicht ohne ein konkret definiertes Anwendungsszenario des Serviceroboter-Konzepts durchgeführt werden. Im ersten Schritt ist daher zunächst ein detailliertes Anwendungsszenario und Prozessmodell zu entwickeln (z.B. Einsatzbedingungen und -häufigkeiten, Arbeitszeitmodelle etc.), auf dessen Grundlage anschließend sämtliche anfallenden LCC-Kostenarten strukturiert erfasst und in geeignete Kostenblöcke zusammengefasst werden können (vgl. Abbildung 2-5.4).

Zu beachten ist dabei, dass insbesondere die entscheidungsrelevanten Kosten abgebildet werden. Also genau solche, die sich durch die Entscheidung für die eine oder andere Alternative sowohl in ihrer Art als auch Höhe beeinflussen lassen. Die darauf aufbauende Schätzung der Höhe und des Zeitpunkts der relevanten Kostenfaktoren ermöglicht dann

die Ableitung der Lebenszykluskosten über die Gesamtnutzungsdauer der Serviceroboter-Anwendung im konkreten Anwendungsszenario, insbesondere unter Berücksichtigung wesentlicher Determinanten der Betriebskosten (z.B. Ausfallzeiten, Ausfallhäufigkeiten, -verteilung, etc.).

Nicht entscheidungsrelevante Kosten können erfasst werden, soweit es der Verdeutlichung eines Sachverhalts dienlich ist. Fallen beispielsweise in zwei zu vergleichenden Alternativen die gleichen Personalkosten in Art und Höhe an (z.B. jeweils ein Techniker), so sind diese zwar nicht entscheidungsrelevant, sie haben aber ggf. einen wichtigen informativen Charakter für den Entscheider – insbesondere, wenn man auf diese Weise die reale Kostenstruktur nachbilden kann: Denn sie würden in diesem Beispiel explizit darauf hinweisen, dass man auch im Serviceroboter-Anwendungsfall weiterhin Personal benötigt. Hätte man diese Kosten weggelassen – weil nicht entscheidungsrelevant – so könnte diese Information bei der Ergebnisdarstellung verloren gehen.

Weil dieser Prozess in der Regel nicht so trivial ist, wie er im ersten Augenblick erscheint, wird er vollständig durch das „SR-LCC-Tool“ EDV-technisch unterstützt (vgl. *Kapitel 2.5.4*). Die Berechnungen werden zusätzlich in den Szenariensteckbriefen des *Kapitel 3* ausführlich erläutert.

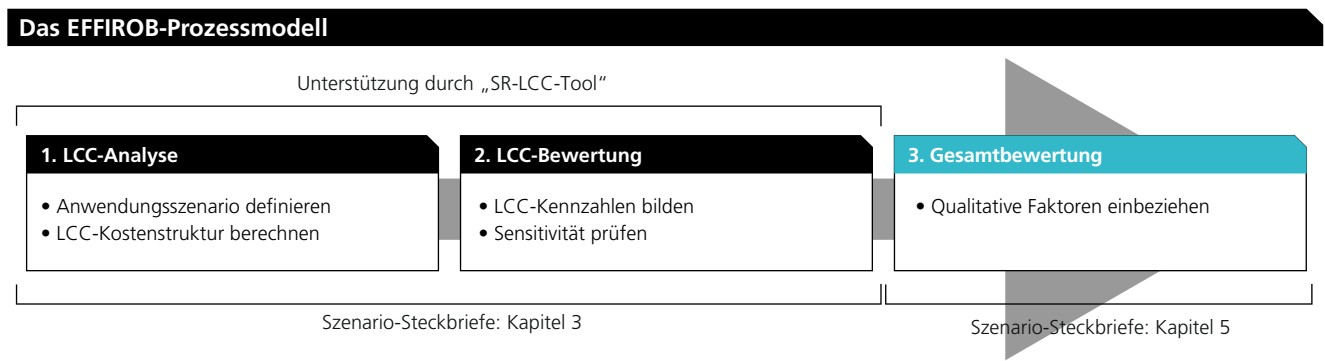


Abb. 2-5.3 Prozessmodell im Rahmen dieser Studie zur betriebswirtschaftlichen Bewertung der Serviceroboter-Konzepte



MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 3 METHODIK

Lebenszyklus-Kostenarten



Abb. 2-5.4 LCC-Kostenarten und -blöcke

Schritt 2: „LCC-Bewertung“

Schritt 1 liefert quasi die Kostenstruktur und damit die Grundlage der eigentlichen LCC-Bewertung. Dabei ist grundsätzlich vorzuschicken, dass es nicht den „richtigen“ oder „falschen“ Ansatz gibt – entscheidend ist immer, ob die gewählten Bewertungskriterien jeweils aus Sicht des Entscheiders vor dem Hintergrund seiner konkreten Situation zweckmäßig sind oder nicht. Im Rahmen dieser Studie werden vor allem vier Kennzahlen als wesentliche Entscheidungsgrößen herangezogen:

- **Die absolute Höhe der LCC.** Dabei handelt es sich um die einfachste Entscheidungsgröße. Je geringer die absolute Höhe der LCC für eine Alternative im Vergleich zu den anderen ist, umso vorteilhafter ist sie einzuschätzen.
- **Der Amortisationszeitraum.** Nachteilig bei der erstgenannten Kennzahl als Entscheidungsgröße ist, dass sie in keiner Weise das mit der Investition verbundene Risiko berücksichtigt. Eine mögliche Kennzahl, die diesen Mangel behebt, ist die Berechnung des Amortisationszeitraums einer bestimmten Alternative basierend auf einem bestimmten

„Ertrag“, den die Alternative während ihres Lebenszyklus für den Anwender liefert. Je kürzer dieser Zeitraum ist, desto geringer ist das mit der Investition verbundene Risiko einzuschätzen. Da hier nur Kosten betrachtet werden, existiert der für die Amortisation notwendige Ertrag allerdings nur „rechnerisch“ im Vergleich zur nächst „schlechteren“ Alternative und kann nur auf eine Ersparnis bei den Betriebskosten, also den Kosten zur Instandhaltung und Wartung und / oder solchen im Zusammenhang mit der Entsorgung zurückzuführen sein.

- **Der Discounted Cash Flow (DCF) der LCC.** Zwar gibt der Amortisationszeitraum als Kennzahl eine Indikation für das mit der Investition verbundene Risiko wieder, er lässt aber immer noch eine weitere wesentliche Größe außer Acht, nämlich die mit der Investition verbundenen „Finanzierungskosten“ im Sinne der „Gewinn-“ und „Risikoerwartungen“ der jeweiligen Kapitalgeber. Die Berechnung des DCF ist dabei ähnlich der der absoluten Höhe der LCC, nur dass hier die entsprechenden Zahlungsströme während des Lebenszyklus auf einen Gegenwartswert (= Kapitalwert) abdiskontiert / abgezinst werden. Auch hier gilt, dass je größer dieser Kapitalwert ist, umso vorteilhafter ist die Investition zu beurteilen. Eine Berücksichtigung des Risikos der Investition kann durch eine entsprechende Erhöhung des Zinssatzes erreicht werden.
- **Kosten pro Leistungseinheit.** Bei dieser Kennzahl wird lediglich die Gesamtsumme der LCC auf die während des Lebenszyklus erbrachte Leistung (z.B. Stück, Servicestunden, etc.) umgelegt. Die Verwendung dieser Kennzahl ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die zu vergleichenden Alternativen unterschiedliche Leistungsniveaus erreichen.

Zwar werden mit diesen Kennzahlen schon die wichtigsten Bewertungskriterien erfasst, da sie aber allesamt auf spezifischen Annahmen beruhen, nämlich den Serviceroboter-Szenarien aus Schritt 1, muss schließlich noch ihre Robustheit im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse überprüft werden: Dazu werden die zuvor getroffenen Annahmen im Sinne von „Wenn-Dann-Analysen“ gezielt relaxiert: Zum Beispiel,



MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 3 METHODIK

indem die Auswirkungen von Skalen- und Preiseffekten in der Herstellung, neue Geschäftsmodelle etc. auf die Höhe und Verteilung der LCC-Kostenarten untersucht werden.

Auch diese Analyse wird durch das „SR-LCC-Tool“ unterstützt und zusätzlich in den Szenariensteckbriefen ausführlich erläutert.

Schritt 3: „Gesamtbewertung“

Bei vielen Anwendungen wird ergänzend ein qualitativer Vergleich notwendig sein, um die Kosten und Nutzen der Service-roboter-Anwendung im Vergleich zum herkömmlichen Betrieb in seiner vollen Bandbreite bewerten zu können. Als Beispiele dafür können eine höhere Genauigkeit bei Operationen durch chirurgische Serviceroboter genannt werden, die zwar einen sehr hohen Nutzen darstellen, aber in der Regel kaum monetär zu fassen sind. Oder die Möglichkeit, feine Risse und Leckagen in Rohren durch geeignete Inspektionsroboter entdecken zu können, die mit herkömmlichen Verfahren nicht zu orten sind. Darüber hinaus sind auch so genannte Nebeneffekte zu beachten, die langfristig positive Auswirkungen

auf Mensch und Umwelt haben können, als monetäre Einsparungen aber kaum quantifizierbar sind. Beispiele hierfür sind Entlastungen der Beschäftigten von (langfristig) belastenden und gesundheitsgefährdenden Tätigkeiten oder der Vergleich der ökologischen Folgen mit dem Ausgangszustand, wenn beispielsweise durch Inspektionsroboter längere Lebenszeiten von Infrastrukturen oder längere Zyklen der vorbeugenden Modernisierung realisierbar wären.

Methodisch könnte an dieser Stelle zwar das Instrument der Nutzwertanalyse (NWA) zum Einsatz kommen, dessen Anwendung bedingt aber eine genaue Kenntnis der Situation des jeweiligen Anwenders und kann daher in dieser Studie nicht generisch durchgeführt werden. Um hier dennoch eine Entscheidungshilfe bieten zu können bzw. eine spätere Anwendung der NWA zu ermöglichen, werden möglicherweise entscheidungsrelevante, qualitative Faktoren in den Szenariensteckbriefen des [Kapitels 3](#) herausgearbeitet und im Rahmen einer Gesamteinschätzung der Marktpotenziale zur Relativierung der Marktpotenziale herangezogen (vgl. [Kapitel 2.6](#)).



MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 4 DAS „SR-LCC-TOOL“

4 Das „SR-LCC-Tool“

Trotz der vielen positiven Aspekte, die eine LCC-basierte Kostenbetrachtung zur Bewertung von langfristigen Investitionsprojekten bietet, setzt sich diese nur zögerlich in der deutschen Industrie durch: Gerade 14% aller Industrieunternehmen nutzen aktuell dieses Instrument.⁴⁶ Tatsächlich scheinen gerade Schwierigkeiten bei der Schätzung der zukünftigen LCC-Kosten das Vertrauen in die Ergebnisse zu reduzieren und damit ursächlich für den geringen Verbreitungsgrad der Methode zu sein – trotz aller Vorteile.⁴⁷

Um diesem Problem zu begegnen, wurde im Rahmen dieser Studie mit dem „SR-LCC-Tool“ ein entsprechendes EDV-Instrument entwickelt. Die Idee zur Entwicklung eines an den Lebenszykluskosten orientierten Berechnungstools für z.B. kleine und mittelständische Unternehmen wurde mit Microsoft Excel realisiert.

Das Tool ist als Ergänzung der Szenariensteckbriefe des Kapitels 3 gedacht und dient quasi als „Taschenrechner“ für eben diese: Die Software ermittelt dabei über Eingabemasken gesteuert die einem bestimmten Serviceroboter-Anwendungsszenario zugrundeliegende LCC-Struktur samt dazugehörigen Kennzahlen.

- Sie beinhaltet alle hier vorgestellten „Serviceroboter-Anwendungsszenarien“ im Sinne einer Datenbank und ermöglicht deren Anpassung bzw. auch das Anlegen „neuer“ bzw. „eigener“ Varianten („Kostenszenarien“).
- Weiterhin unterstützt sie den Vergleich der Varianten eines Anwendungsszenarios – auch im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse.

Da ein Benutzer-Handbuch der Software an anderer Stelle per Download verfügbar ist, sollen im Folgenden nur kurz die Hauptmasken des Tools erläutert werden:

Module des SR-LCC-Tools



- Modul 1**
LCC-Analyse: Berechnung und Analyse der LCC-Struktur
- Modul 2**
LCC-Bewertung: Bewertung der Anwendungsszenarien auf Grundlage der LCC-Kennzahlen und einer Sensitivitätsanalyse

Abb. 2-5.5 SR-LCC-Tool: Hauptmaske

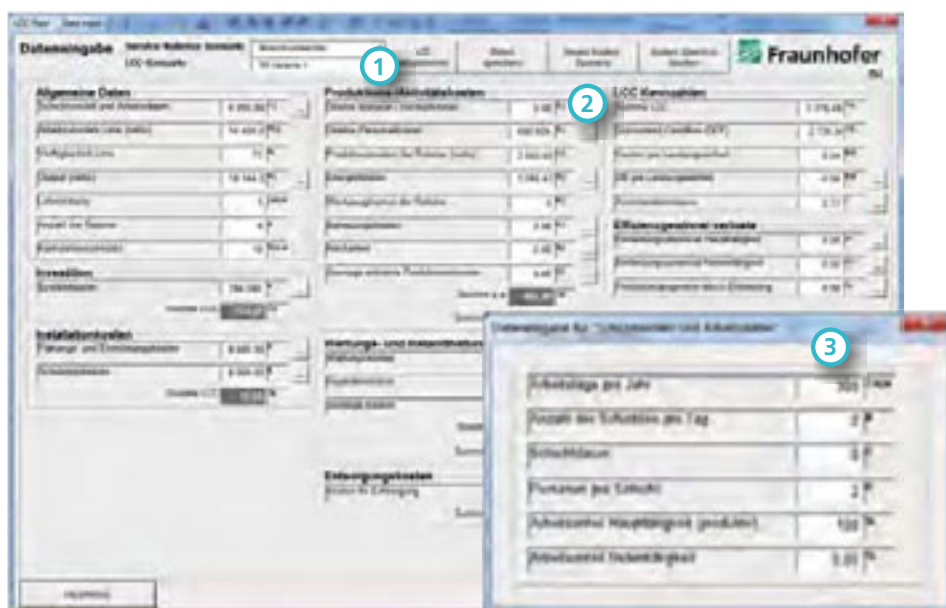
⁴⁶ Schröter, M.; Weißfloch, U.; Buschak, D.: Energieeffizienz in der Produktion – Wunsch oder Wirklichkeit. Mitteilungen aus der ISI-Erhebung, PI-Mitteilung 51, 2009.

⁴⁷ Vgl. Ellram, L.M.: Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 25 (1995) Nr. 8, S. 4-23.

MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 4 DAS „SR-LCC-TOOL“

SR-LCC-Tool: Dialogfenster des Modul 1



- ① **Szenario-Management:**
Auswahl der Serviceroboter-Anwendungsszenarien samt dazugehöriger Alternativen (Kostenalternativen)
- ② **LCC-Definition: Hauptmenü**
 - Strukturierte und dialoggesteuerte Erfassung der LCC-Kostenstruktur
 - Berechnung der LCC-Kennzahlen
- ③ **LCC-Definition: Dialog**
 - Beispiel für einen Dialog
 - Dialoge unterstützen die parametrische Schätzung der LCC-Kennwerte

Abb. 2-5.6 SR-LCC-Tool: Modul 1 mit Hauptmaske und Dialogfenster

SR-LCC-Tool: Ergebnisdarstellung des Modul 1

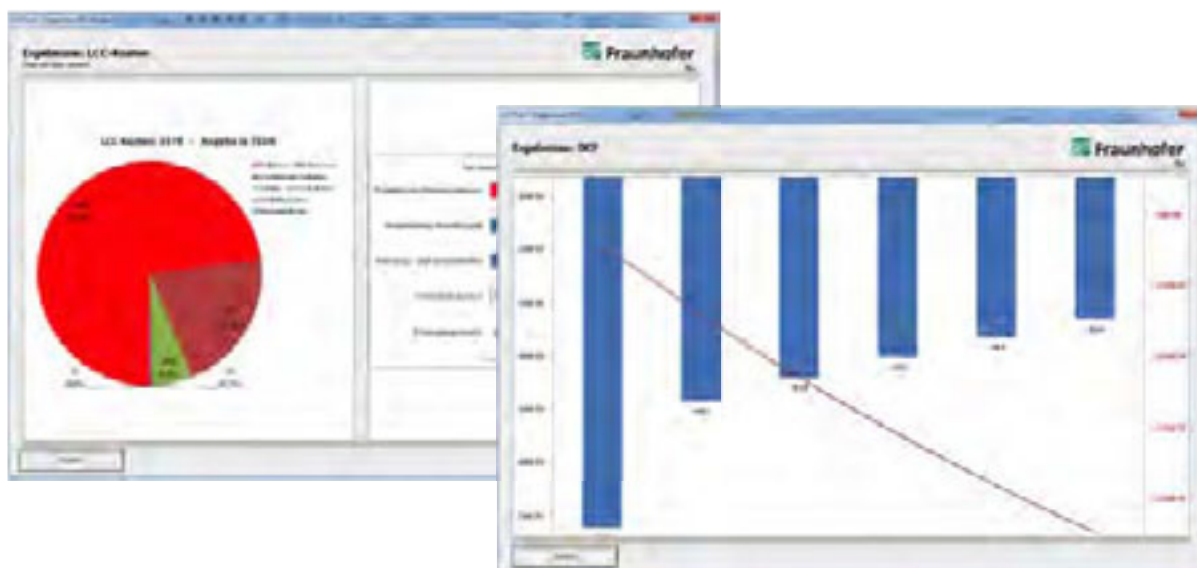
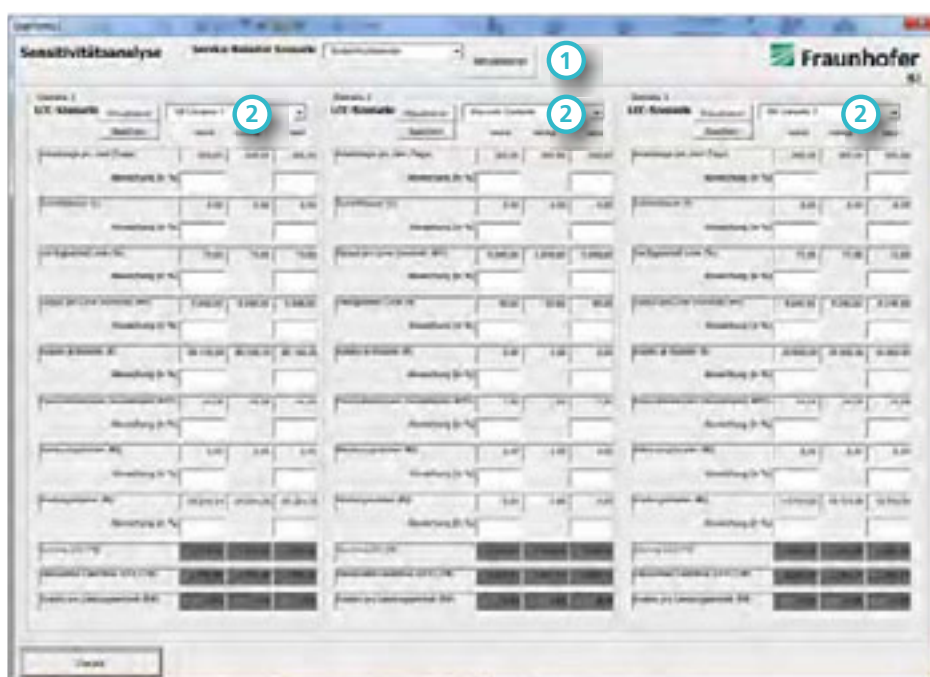


Abb. 2-5.7 SR-LCC-Tool: Modul 1 mit Ergebnis-Darstellung

MARKTSTRUKTURANALYSE

→ 4 DAS „SR-LCC-TOOL“

SR-LCC-Tool: Dialogfenster des Modul 2



① Szenario-Management:
Auswahl des Serviceroboter-
Anwendungsszenarios

② Vergleichsfelder für bis zu drei
„Kostenszenarien“ gleichzeitig

- Eingabefelder für Sensitivitäts-
analyse (Best/Worst case)
- Gleichzeitig bis zu drei
LCC-Kosten Alternativen
eines Anwendungsszenarios
vergleichbar

Abb. 2-5.8 SR-LCC-Tool: Modul 2 mit Hauptmaske

MARKTSTRUKTUR- UND POTENZIALANALYSE

Um abschätzen zu können, auf welche potenzielle Nachfrage die gefundenen Lösungen treffen könnten, ist entsprechend dem in Abb. 2-5.3 skizzierten Prozessmodell neben der betriebswirtschaftlichen Bewertung der Serviceroboter-Konzepte auch eine detaillierte Analyse der Strukturen der jeweils relevanten Zielmärkte notwendig. Zentrales Element ist dabei insbesondere das konkrete Investitionsverhalten der jeweiligen Zielgruppe – wichtige Parameter dafür sind u.a. (vgl. Abb. 2-5.4; bzw. in den Szenariensteckbriefen ([Kapitel 4.1](#)):

- **Die Marktgröße.** Die Anzahl der in einem Marktnachfrageseitig potenziell auftretenden Unternehmen stellt eine erste wichtige Kenngröße dar, die die Größe eines Servicerobotik-Teilmarktes charakterisieren kann.
- **Die Größenstruktur und Konzentration des Zielmarkts.** Serviceroboter-Investitionen stellen normalerweise hohe Anforderungen an die Finanzierungsfähigkeit der jeweiligen Unternehmen, und zwar insbesondere an die absolute Höhe der ihnen dafür zur Verfügung stehenden Finanzmittel – diese nimmt tendenziell zusammen mit der Innovationsneigung der Unternehmen mit wachsender Unternehmensgröße zu. Daneben ist es auch wichtig, den Konzentrationsgrad der potenziell als Nachfrager auftretenden Firmen zu berücksichtigen. Wenn die 10 größten Nachfrager eines Marktes 90 Prozent der Nachfrage ausmachen, ist die wirtschaftliche Macht der Nachfrageseite hoch konzentriert. Dies hat zur Folge, dass diese Nachfrager die Preise von Leistungsangeboten in hohem Maße beeinflussen können, was für die Rentabilität von innovativen Angeboten des Herstellers nicht unwesentlich ist.
- **Die ökonomische Situation.** Die wirtschaftliche Lage der Firmen bzw. Organisationen, die nachfrageseitig einen Markt ausmachen, ist ein weiterer Parameter, der in Anwendungsszenarien zu berücksichtigen ist. Sind die Renditen potenzieller Nachfrager schlecht und schrumpfen deren Märkte, werden innovative Angebote seitens der Anbieter von Servicerobotern erfahrungsgemäß auf weniger Nachfrage treffen als in Märkten, die prosperieren.
- **Die konkrete Investitionsquote.** Die Investitionsquote der Nachfrager auf einem Servicerobotik-Teilmarkt stellt

ein weiteres wichtiges Marktdatum dar, das es in Anwendungsszenarien zu berücksichtigen gilt. Wo eine geringe Investitionsbereitschaft herrscht, wird es schwieriger sein, Servicerobotik-Märkte zu entwickeln.

- **Innovationsverhalten.** Die Innovationskultur der Nachfrageseite eines Marktes, definiert als die Bereitschaft, innovative Leistungsangebote aufzugreifen, ist zur Charakterisierung eines Marktes für Servicerobotik-Anwendungen ebenfalls wesentlich. In Märkten mit einem wenig innovationsaffinen Kundenkreis wird es ungleich schwerer werden, innovative Leistungsangebote zu platzieren.

Auf Grundlage der so definierten Marktstrukturanalyse werden dann die jeweiligen Marktpotenziale in einem modifizierten Gegenstrom-Verfahren, also sowohl top-down als auch bottom-up, auf Grundlage der für Investitionen im jeweiligen Teilmarkt insgesamt verfügbaren Finanzmittel abgeschätzt; Abbildung 2-6.2 skizziert diesen Prozess:

Marktstrukturanalyse

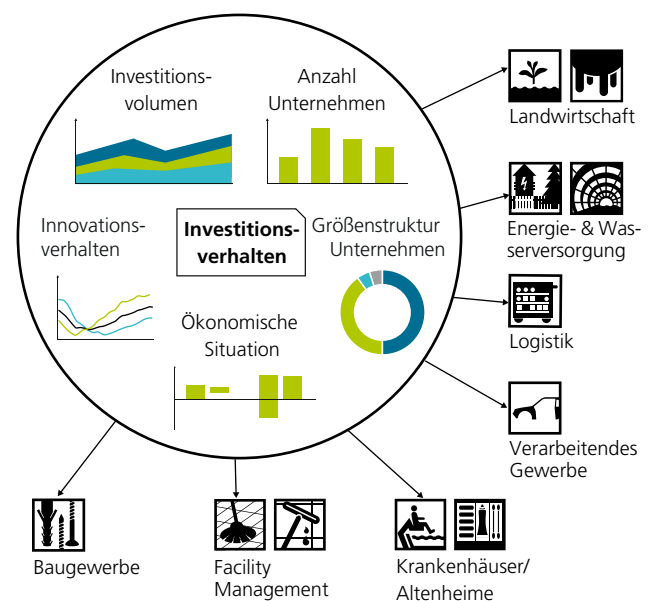


Abb. 2-6.1 Marktstrukturanalyse – zentrale Parameter

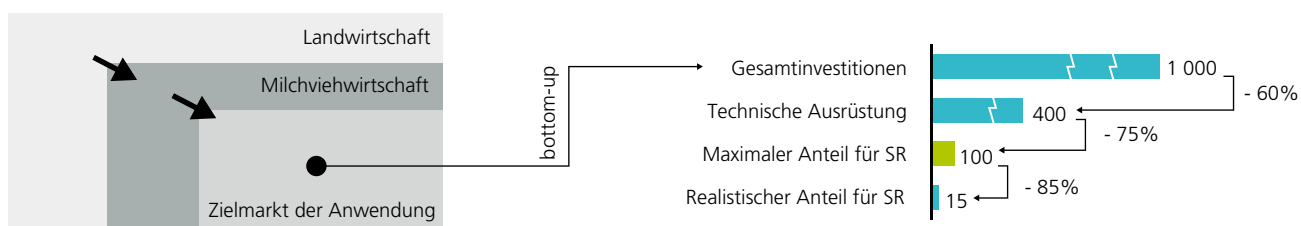


MARKTSTRUKTUR- UND POTENZIALANALYSE

Prozessmodell zur Abschätzung des Marktpotenzials

Eingrenzung Grundgesamtheit
Anzahl der Betriebe

Abschätzung des Marktpotenzials
€ p.a.



1. Eingrenzung der Grundgesamtheit (top-down)
2. Abschätzung der Gesamtinvestitionen (bottom-up)

3. Abschätzung des maximalen Marktpotenzials (top-down)
4. Abschätzung der realistischen Ausnutzung des Marktpotenzials

Abb. 2-6.2 Abschätzung des Marktpotenzials auf Grundlage der für Investitionen im jeweiligen Teilmarkt verfügbaren Finanzmittel.

- **Eingrenzung der Grundgesamtheit.** Die Serviceroboter-Konzepte sind in der Regel immer nur jeweils für einen Teil des Gesamtmarktes relevant. Dieser wird geeignet top-down auf den eigentlichen Zielmarkt im Sinne einer Schätzung der Anzahl der Betriebe eingegrenzt. Grundlage für diese Schätzung sind statistische Daten sowie einschlägige Studien.
- **Abschätzung der Gesamtinvestitionen.** Basierend auf der so eingegrenzten Zielgruppe wird eine bottom-up Schätzung für die diesen Unternehmen insgesamt zur Verfügung stehenden Finanzmittel für Investitionen durchgeführt. Dazu werden die durchschnittlichen Investitionen je Betrieb (oder auf der Grundlage einer anderen geeigneten Bezugsgröße) auf die gesamte Zielgruppe hochgerechnet. Ausgangspunkt für diese Schätzung ist dabei insbesondere die schon erwähnte Marktstrukturanalyse.
- **Abschätzung des maximalen Marktpotenzials.** Anschließend werden die Gesamtinvestitionen wieder systematisch auf die für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehenden Finanzmittel heruntergebrochen. Dies erfolgt über eine Schätzung des möglichen Anteils von Serviceroboter-Investitionen an den Brutto-Investitionen in Maschinen und Anlagen, und erfolgt, weil in der Regel geeignete statistische Daten und Studien nicht vorhanden sind, basierend auf Expertenaussagen.
- **Abschätzung der realistischen Ausnutzung des Markt-**

potenzials. Das so abgeleitete Marktpotenzial ist schließlich hinsichtlich seiner Ausnutzung auf ein „realistisches“ Maß einzuschränken. Dies erfolgt hier auf Grundlage der Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Analyse sowie unter der Anwendung geeigneter Plausibilitäts-Prüfungen. Gerade letztere sind im Rahmen dieser Studie besonders relevant – auch weil diese Prüfung in der Praxis häufig entfällt. Da der Prozess insgesamt an zwei Stellen auf top-down Schätzungen beruht, sind die errechneten Marktpotenziale immer vor dem Hintergrund der Eigenschaften der betrachteten Zielgruppe (Marktstrukturanalyse) zu reflektieren.

Insgesamt ist festzustellen, dass der hier skizzierte Prozess nur ein Grundgerüst darstellt, der inhaltlich in Abhängigkeit des vorhandenen Datenmaterials für jeden Szenariensteckbrief spezifisch anzupassen ist. Daher wird hier für Details auf das [Kapitel 4](#) der jeweiligen Szenariensteckbriefe verwiesen.

ABSCHÄTZUNG SKALENÖKONOMISCHER EFFEKTE

Im Folgenden wird eine qualitative Methode vorgeschlagen, um zu beurteilen ob und in wie fern Skaleneffekten bei der Produktion von Servicerobotern eine Bedeutung für eine Erhöhung des Marktpotenzials zukommen könnte. Abb. 2-7.1 skizziert die im Folgenden vorgeschlagene Vorgehensweise-

Wie in Abbildung 2-7.1 dargestellt, ist der Ausgangspunkt für skaleneconomische Betrachtungen die Gesamtheit der Marktstrukturanalysen (MSA) und Serviceroboter-Konzepte aller Szenarien. Aufbauend auf der Zusammenführung der Gesamtstückzahlen könnten sich für jede Komponente die derzeit abgesetzten Stückzahlen unter Annahme der Realisierung der

vorgeschlagenen Serviceroboter-Konzepte abschätzen lassen. Um beurteilen zu können, wie stark sich die Differenz zwischen derzeitiger und potenzieller Absatzhöhe auf den Preis auswirkt, müssten dann für die jeweilige Komponente die aktuelle Position auf der Kostendegressionskurve abgeschätzt werden. Je höher diese auf der Kurve ist, desto höher ist das zu erwartende Kostendegressionspotenzial einzuschätzen. Normalerweise ist diese Position auf Basis der kumulierten Produktionsmenge zu bestimmen. Da diese jedoch ex ante nicht ohne Weiteres zu bestimmen bzw. zu beurteilen ist, könnte dafür ersatzweise der technologische Reifegrad einer Komponente als Indikator herangezogen werden. Allerdings

Abschätzung skaleneconomischer Effekte

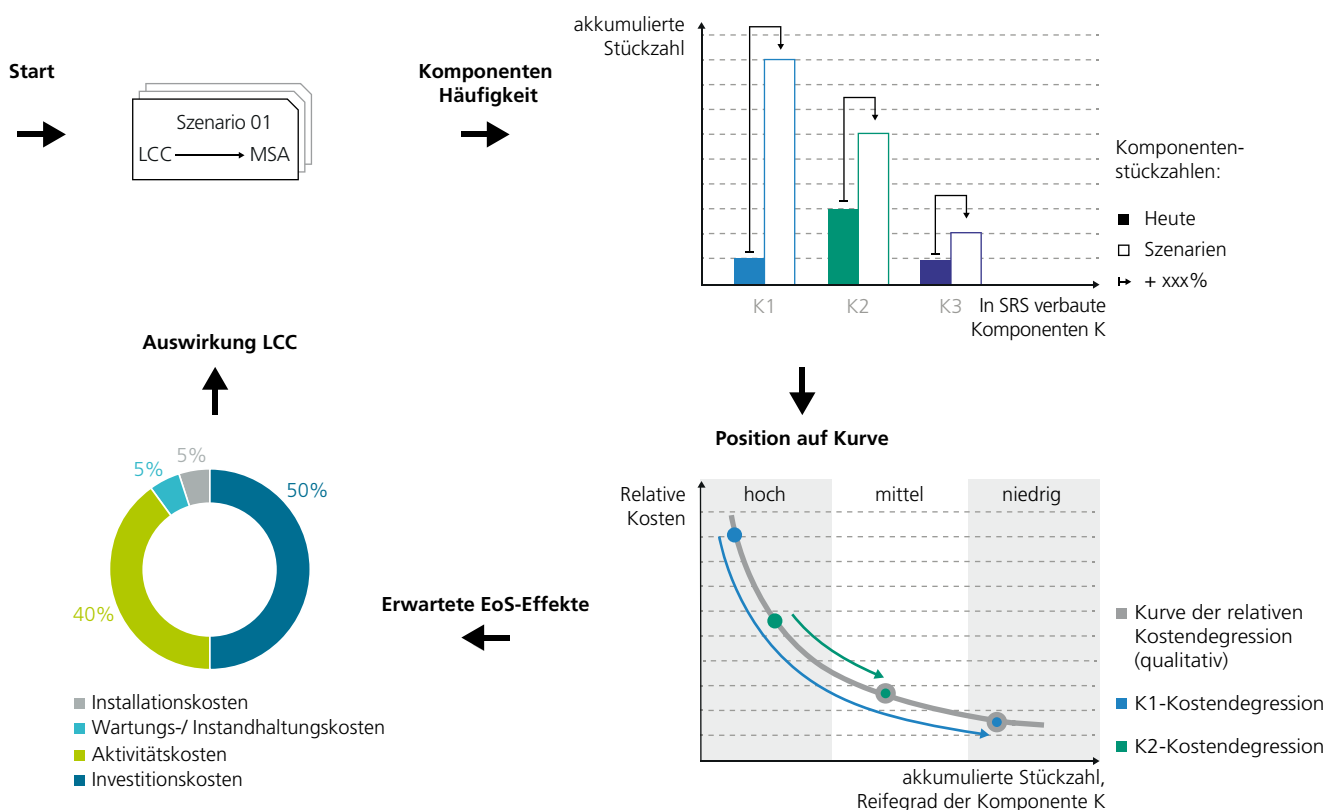


Abb. 2-7.1 Zyklische Abschätzung der komponenten-bezogenen Skaleneffekte



ABSCHÄTZUNG SKALENÖKONOMISCHER EFFEKTE

sollte dieses Potenzial dann ebenfalls nur qualitativ bewertet werden (z.B. mit „niedrig“, „mittel“ und „hoch“).

Geht man nun von der Annahme aus, dass die Hersteller der Serviceroboter und Komponenten diese Ersparnisse an die Kunden in Form von Preisnachlässen weitergeben, so könnte letzten Endes ein positiver Feedback-Prozess einsetzen: Sinken die Anschaffungskosten für den Serviceroboter, so wird dies in eine Nachfrageerhöhung münden, die selber wiederum zu einer Rechtsverschiebung auf der Kostendegressionskurve führt und damit weitere Kostensenkungen auslöst.

Damit dieser Prozess einsetzt, müssen allerdings die Anschaffungskosten des Serviceroboters einen signifikanten Anteil an den Lebenszykluskosten haben – ansonsten werden Reduzierungen der Anschaffungskosten nicht den gewünschten Effekt auf die Kaufentscheidung der Kunden haben.

Neben der Annahme, dass die Hersteller diese Ersparnisse auch (zumindest teilweise) an die Kunden weitergeben, muss weiterhin berücksichtigt werden, dass in Skaleneffekte auch investiert werden muss: d.h. es muss davon ausgegangen werden, dass die Hersteller auch entsprechende Aktivitäten zur Verbesserung ihrer Prozesse und Produkte durchführen.



SZENARIOBEARBEITUNG

Ablauf der EFFIROB-Bearbeitung

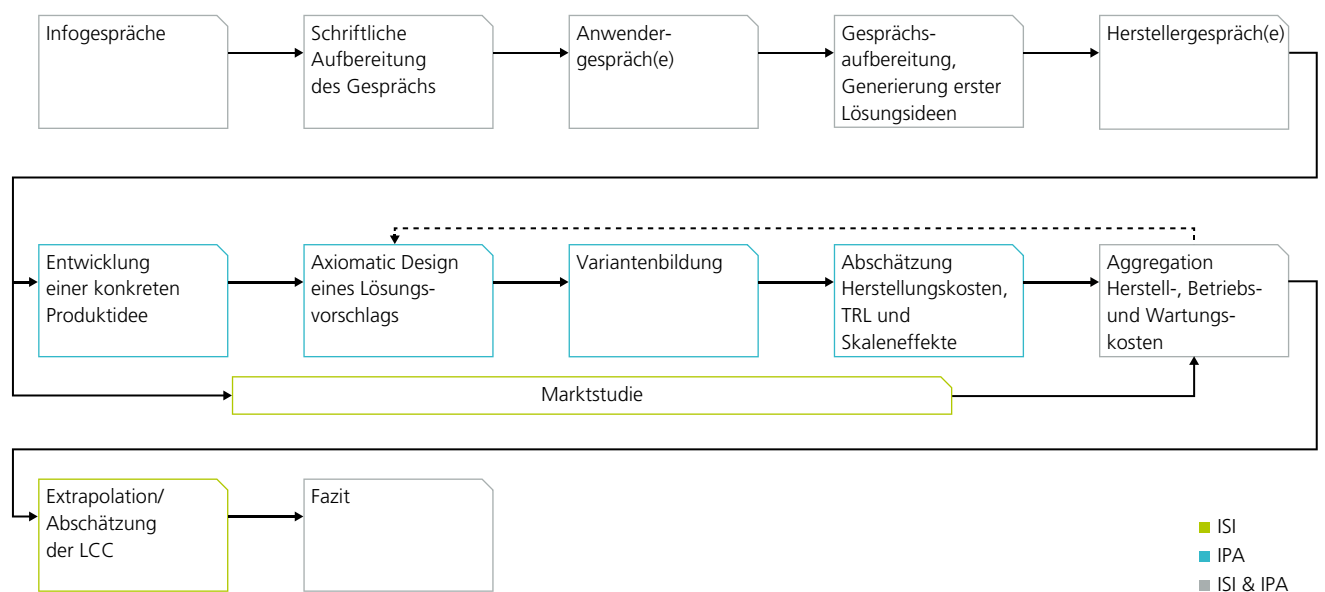


Abb. 2-8.1 Szenariobearbeitung

Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Techniken kommen bei der Bearbeitung jedes Serviceroboter-Szenarios zur Anwendung, um so eine systematische Vorgehensweise zu gewährleisten. Abbildung 2-8.1 gibt einen Überblick über den Ablauf der Vorgehensweise. Zunächst werden Daten in Interviews zusammengetragen. In Abhängigkeit von den Ergebnissen der Recherche wird ein Robotersystem entworfen und der relevante Absatzmarkt

untersucht. Für den Roboter werden zentrale Kostengrößen geschätzt, basierend auf den verwendeten Technologien. Aus den Erkenntnissen über Technologien und Marktstrukturen lassen sich Lebenszykluskosten extrapolieren. Abschließend wird das Serviceroboter-Szenario aus wirtschaftlicher und technologischer Sicht beurteilt und etwaige Forschungsbedarfe werden aufgezeigt.

SZENARIOBEARBEITUNG

→ 1 ZUSAMMENFASSUNG DER METHODEN UND IHRE ANWENDUNG IN DEN STECKBRIEFEN

1 Zusammenfassung der Methoden und ihre Anwendung in den Steckbriefen

Die erarbeiteten Steckbriefe sind weitgehend einheitlich wie folgt gegliedert und nutzen die in *Kapitel 2* eingeführten Methoden, Hilfsmittel und Darstellungsweisen. Alle Szenariensteckbriefe weisen folgende Gliederung auf:

- | | |
|---|--|
| <p>i 1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung 1.2 Probleme 1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik 1.4 Weiterführende Informationen <ul style="list-style-type: none"> 1.4.1 Anwenderbranche 1.4.2 Einsatzbereich <p>🔧 2 Systemkonzepte</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.1 Aufgaben des Serviceroboters 2.2 Roboterentwurf <ul style="list-style-type: none"> 2.2.1 Zentrale Hardware-Komponenten 2.2.2 Software 2.2.3 Varianten | <p>👤 3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung versus Status quo</p> <ul style="list-style-type: none"> 3.1 Life Cycle Costing 3.2 Nutzwert <p>📈 4 Marktdaten</p> <ul style="list-style-type: none"> 4.1 Marktstrukturdaten 4.2 Marktpotenzial für Servicerobotik <p>{ 5 Fazit</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.1 Wirtschaftlichkeit 5.2 Forschungsbedarf <p>📄 6 Anhang</p> |
|---|--|

Graphiken, Tabellen und Diagramme werden wie folgt weitgehend einheitlich eingesetzt:

Kap.	Diagramm und Darstellung	Hilfsmittel	Aussage
1	Manuelles, aktuelles Arbeitssystem	Photos, Schemas	Komponenten des manuellen, aktuellen Arbeitssystems oder Szenarios (Mensch-Arbeitsmittel-Objekt-Umgebung)
	Anwendungsfall-Diagramm	Anwendungsfall-Diagramm (UML)	Akteure des bestehenden (manuellen) Arbeitssystems/Szenario, Hauptprozesse
	Sequenzdiagramm Ausgangs-Szenario	Sequenz-Diagramm (UML)	Interaktionen der Komponenten des bestehenden Arbeitssystems/Szenarios
2	Sequenzdiagramm automatisiertes Szenario	Sequenz-Diagramm (UML)	Interaktionen der Komponenten des automatisierten Arbeitssystems/Szenarios
	Roboterentwurf	3-D CAD-Bild	Vorgeschlagenes „roboterisiertes“ Szenario (Mensch-Roboter-Objekt-Umgebung)
	Functional Requirements FR	FR-Diagramm/AD	Funktionelle Dekomponierung des Szenarios
	Design Parameters DP	DP-Diagramm/AD	Lösungsmodule in HW/SW des automatisierten Szenarios
	TRL/€/FR-Diagramme für „kritische Funktionen“	Basis FR/DP-Diagramme des AD	Visualisierung Anforderung an Komponente vs. aktueller/vermuteter Stückpreis und TRL-Level
	SR-Variante B des automatisierten Szenarios	FR-DP-Diagramme	Variation der funktionellen Dekomponierung, Wahl der Lösungsmodule des automatisierten Szenarios
	Komponentenübersicht	Tabelle	Liste der FRs, DPs, Komponentenkosten, TRL, Relevanz der Komponente für das Szenario, kritische Parameter
3	Life Cycle Costs der Varianten	Tabelle	LCC der Szenarien: konventionell/manuell vs. roboterisiert; inkl. Varianten
4	Marktdaten	Abbildungen, Balkencharts, Tabellen	Marktstrukturdaten, Investitionsverhalten, Marktpotenzial in Zielmärkten bzw. in Anwendungs-“Domains“
5	Fazit		
6	Anhang	Tabelle	Anschaffungskosten Hardware

Tab. 2-8.1 Aufbauchema jedes Steckbriefs nach Kapitel und Diagrammen sowie nach Einsatz der verwendeten Hilfsmittel



SZENARIOBEARBEITUNG

→ 2 STRUKTUR EINES SZENARIOSTECKBRIEFES

2 Struktur eines Szenariosteckbriefes

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile und die Kapitelstruktur der Steckbriefe genauer erläutert:

Kapitel 1 der jeweiligen Steckbriefe beschreibt den konkreten Anwendungsfall des jeweiligen Szenarios; im Wesentlichen werden hier die Daten dargestellt, die aus Gesprächen mit Experten der jeweiligen Branche durchgeführt wurden. In Kapitel 1.1 wird die derzeitige Aufgabendurchführung beschrieben, wobei auf involvierte Menschen, Arbeitsobjekte, Betriebsmittel und Umgebung eingegangen wird; Fotos sowie schematische Darstellungen⁴⁸ des Anwendungsfalles dienen der visuellen Verdeutlichung. Kapitel 1.2 zeigt Probleme mit dem Status quo auf und Kapitel 1.3 stellt dar, wie diese mit Hilfe von Servicerobotern behoben oder gemindert werden könnten. Kapitel 1.4 enthält weitere Informationen über die betrachtete Branche und typische Aufgaben.

In Kapitel 2 wird die technische Lösung mindestens eines der in 1.2 beschriebenen Probleme vorgestellt. In Kapitel 2.1 sind die einzelnen Aufgaben des Roboters beschrieben. Sequenzdiagramme sollen deren Ablauf verdeutlichen. Kapitel 2.2 präsentiert das technische Konzept des Serviceroboters. Hierbei handelt es sich nicht um exakte Konstruktionsanleitungen, sondern vielmehr um skizzenartige Visionen eines Roboters. In Kapitel 2.2.1 wird ein möglicher Aufbau dieses Roboters an Hand von Strukturbäumen der modifizierten Methode des Axiomatic Designs (s. Kapitel 2.1) aufgezeigt. Zentrale Hardware-Komponenten werden kurz beschrieben.

Diejenigen Komponenten, die im Vergleich zu den anderen als weniger ausgereift beurteilt wurden, werden mit Hilfe der vorgeschlagenen TRL / € / FR-Diagramme genauer veranschaulicht. Abbildung 2-8.2 zeigt ein solches Diagramm mit 2 Schranken, das für eine Komponente die Erfüllung einer funktionalen Anforderung (= Functional Requirement FR) auf der horizontalen Achse darstellt. Die Farbe der Schranken der

System Range symbolisieren, ob die Anforderung ein Überschreiten dieser Grenzen verlangt oder verbietet: rot bedeutet Nichterfüllung bei Überschreitung der Schranken, grün Erfüllung im selben Fall. Die positive vertikale Achse repräsentiert die Kosten der Komponente (pro Stück), die negative vertikale Achse den technologischen Reifegrad (= Technology Readiness Level TRL), siehe Kapitel 2.3.1.

In Anlehnung an die TRL-Skala aus der Raumfahrt werden Reifegrade der Roboterlösungen von 1 bis 9 eingeteilt. In Abbildung 2-8.2 ist beispielhaft eine Komponente (Lokalisierungsgenauigkeit) dargestellt, die für FR_i die Anforderung auf eine Genauigkeit ±5 cm (über-)erfüllt, 3,5 Tsd Euro kostet und einen technologischen Reifegrad von 8 hat.

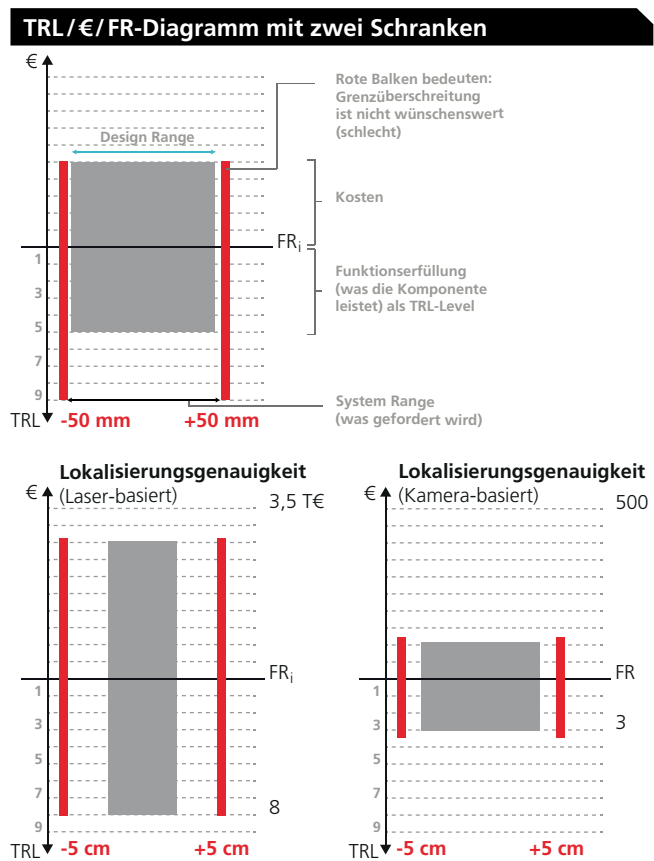


Abb. 2-8.2 Beispielhaftes TRL/€/FR-Diagramm mit zwei Schranken

48 Die dargestellten Diagramme sind keine Anwendungsfall- und Sequenzdiagramme i.e.S., d.h. sie sind nicht streng nach UML2 ausgelegt, sondern lediglich an diese angelehnt, um eine visuelle Hilfe zwecks Verständniserleichterung zu bieten.

SZENARIOBEARBEITUNG

→ 2 STRUKTUR EINES SZENARIOSTECKBRIEFES

In Abbildung 2-8.3 rechts ist eine Komponente dargestellt, die die Anforderung $FR_{3,2}$ an die benötigte Tragkraft von 250 kg weit überschreitet, 30 Tsd Euro kostet und einen Reifegrad von 8 hat.

Ähnlich wie Kapitel 2.2.1 beschreibt Kapitel 2.2.2 wesentliche Komponenten des Roboters, allerdings softwarespezifisch. In Kapitel 2.2.3 wird eine Variante des vorgestellten Roboterentwurfs dargestellt. Varianten können Funktionserweiterungen, Funktionseinschränkungen mit einhergehender Kostenreduktion oder Einsatz technologischer Alternativen bei gleichbleibender Funktionserfüllung beinhalten. Bei Bezügen auf die verschiedenen Entwürfe bezeichnet „SR-Variante A“ die Primärlösung, „SR-Variante B“ die modifizierte Version. Eine Liste am Ende von Kapitel 2 fasst die Informationen zu den zentralen Komponenten des Roboterentwurfs zusammen wie in Tabelle 2-8.2 beispielhaft dargestellt. Die Relevanz jeder Komponente in Bezug auf die Sicherung von Leistungs- und Funktionsmerkmalen des konzipierten Serviceroboter-Systems wird subjektiv mit 0 (= niedrig), 1 (= mittel) oder 2 (= hoch) eingestuft. Kosten sind Angaben pro Komponente, daher werden Software-Entwicklungskosten an dieser Stelle nicht aufgenommen, da sie

weitestgehend einmalige Fixkosten darstellen. In Kapitel 3 wird der Status quo mit der vorgeschlagenen Serviceroboter-Lösung verglichen. In Kapitel 3.1 werden die wichtigsten Kenngrößen einer Lebenszykluskostenrechnung für die derzeitige Lösung der Aufgabenerledigung unter Zuhilfenahme der Servicerobotik gegenübergestellt. In Kapitel 3.2 werden Nutzwerte des Serviceroboters genannt, die sich nicht wirtschaftlich quantifizieren lassen, aber dennoch mögliche Vorteile für den Anwender darstellen.

Nochmals anzumerken ist, dass sich das konzipierte Serviceroboter-System als auch dessen Wirtschaftlichkeitsabschätzung auf ein spezifisches Szenario bezieht. Ergebnisse aus den jeweiligen Szenarien sollten nicht auf Zielmärkte oder Branchen verallgemeinert werden.

In Kapitel 4 werden die szenario-relevanten Marktdaten präsentiert. Während Kapitel 4.1 eher allgemein die jeweilige Branchenstruktur beleuchtet, wird in Kapitel 4.2 das konkrete Marktpotenzial für den vorgeschlagenen Serviceroboter hergeleitet. Die Marktbetrachtung erfolgt für den deutschen Wirtschaftsraum.

TRL / € / FR-Diagramm mit einer Schranke

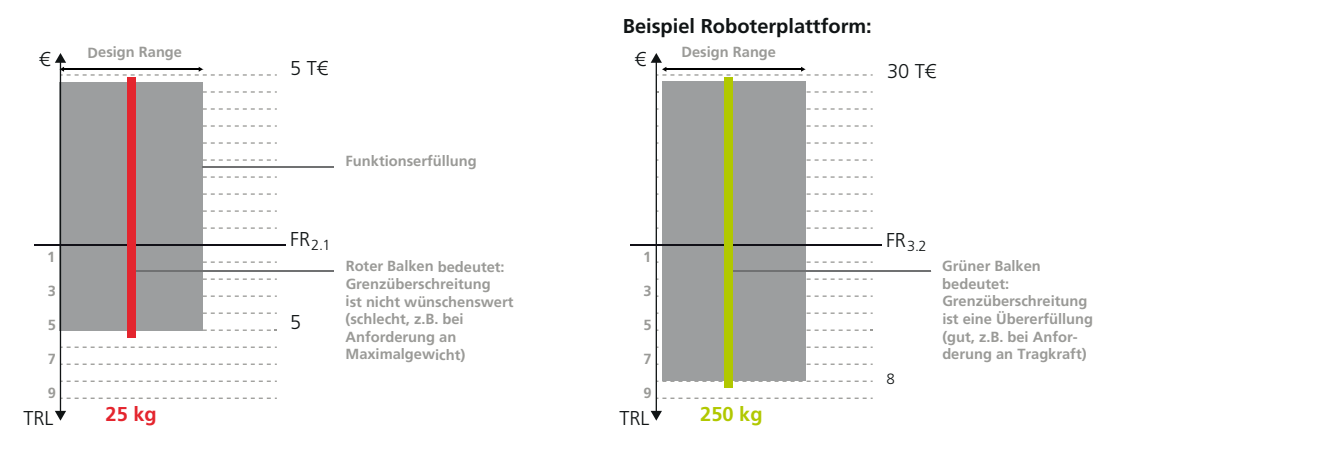


Abb. 2-8.3 TRL/€/FR-Diagramm mit einer Schranke



SZENARIOBEARBEITUNG

→ 2 STRUKTUR EINES SZENARIOSTECKBRIEFES

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic-Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic-Design)	Kosten (Komponente)	TRL (1-9)	Relevanz für Szenario (0-2)	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
...
FR 2.1	Schutz gg. unbefugtes Bedienen	DP 2.1a Nutzer Authentifizierung		8	0	Anpassung existierender Lösungen
		DP 2.1b Touchscreen	1 000	8	0	Systeme im Anwendungsbereich vorhanden
...

Tab. 2-8.2 Struktur der Komponentenliste in den Steckbriefen (weitere Erklärungen in den Steckbriefen).

Kapitel 5 stellt das zusammenfassende Kapitel des Steckbriefes dar. In Kapitel 5.1 werden alle wirtschaftlich relevanten Aussagen zu der Roboterlösung resümiert, Kapitel 5.2 legt Augenmerk auf die Bereiche, in denen noch Forschungsbedarf bezüglich des präsentierten Roboterentwurfs besteht. In Kapitel 6 der Steckbriefe finden sich Tabellen mit detaillierter Aufschlüsselung der hergeleiteten Kosten. In den einzelnen Kapiteln werden Quantifizierungen relevanter Aspekte dargestellt. Derartige Daten, für die keine Quellen angegeben sind, stammen aus den szenario-spezifischen Fachgesprächen.

WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSEN NEUARTIGER ROBOTIK-ANWENDUNGEN UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE ROBOTIK-ENTWICKLUNG

SZENARIENSTECKBRIEFE

- 01
- 02
- 03
- 04
- 05
- 06
- 07
- 08
- 09
- 10
- 11



01 Außenanlagenwartung



02 Bereitstellen von Pflegeutensilien



03 Bewegen von Personen in der stationären Altenpflege



04 Bodenfrüchteernte



05 Bodenreinigung



06 Containertransport im Krankenhaus



07 Fassadenreinigung



08 Innenausbauassistentz



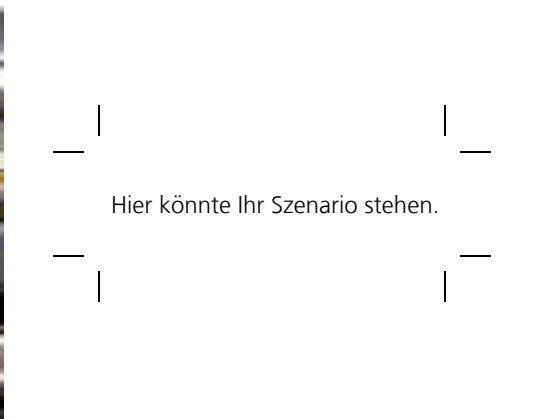
09 Kanalinspektion



10 Milchviehhaltung



11 Produktionsassistentz



Hier könnte Ihr Szenario stehen.

SZENARIOSTECKBRIEF

AUSSENANLAGENWARTUNG



01



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG





01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Unbemannte Außenanlagen von Versorgungsnetzen müssen in regelmäßigen Abständen gewartet und deren Technik inspiziert werden. Dazu zählen Umspannwerke, Pumpstationen für Wasser sowie Tanklager. Die meisten Anlagen verfügen über ein Gebäude, Stromanschluss, Wasserversorgung und Kommunikationsanschluss für die Fernwartung.

Typische Tätigkeiten:

- Unregelmäßige Besuche von Wartungstechnikern oder Betriebspersonal
- Alle zwei bis vier Wochen oder wenn witterungsbedingte Schäden zu befürchten sind
- Hoher Aufwand für Wartungsarbeiten wie Mähen und Reinigen
- Wartungsarbeiten mindestens eine Stunde
- Erheblicher Aufwand für die Anfahrt (bis zu drei Stunden)
- Hohes Risiko, unentdeckte Beschädigungen führen oft zum Funktionsausfall
- Hoher Aufwand für manuelles technisches Monitoring wie visuelle Anlageninspektion, Thermografie oder Routine-messungen.
- Durchführung von technischen Wartungsarbeiten wie das Ablesen von Messgeräten und die Überprüfung von Leitungen und Rohren
- Technische Innenkontrolle visuell, akustisch, teilweise Gas/Luft
- Außenkontrolle und Alarmierung
 - Bauwerk auf Beschädigungen durch Bewitterung, Sturm, Wasser, Beschuss, Steinewerfer überprüfen
 - Kontrolle der Umfriedung auf Schäden durch Bewitterung und gewaltsames Eindringen, Dreckeintrag, Schnee- und Sturmbruch
- Kehren und Schmutzbeseitigung
- Grasmahd bei Bedarf
- Gehölz zurückschneiden bei Bedarf
- Freischneiden der Umfriedung bei Bedarf.

Außenanlagen



Abb. 3-1.1 Außenanlagen in der Wasser- und Gasversorgung

Handelsübliche Gartengeräte stehen entweder vor Ort zur Verfügung oder müssen, bei kleinen Anlagen, mitgebracht werden. Ablauf einer Wartung, typische Tätigkeiten:

- Anfahrt von ein bis zwei Technikern
- Wartung und Bereitstellung (auch Transport) der Maschinen für die Bodenbearbeitung, Bodenreinigung und Gartenarbeit (wie Heckenscheren)

Außenanlagen



Abb. 3-1.2 Eingefriedete Außenanlagen

i



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Sequenzdiagramm

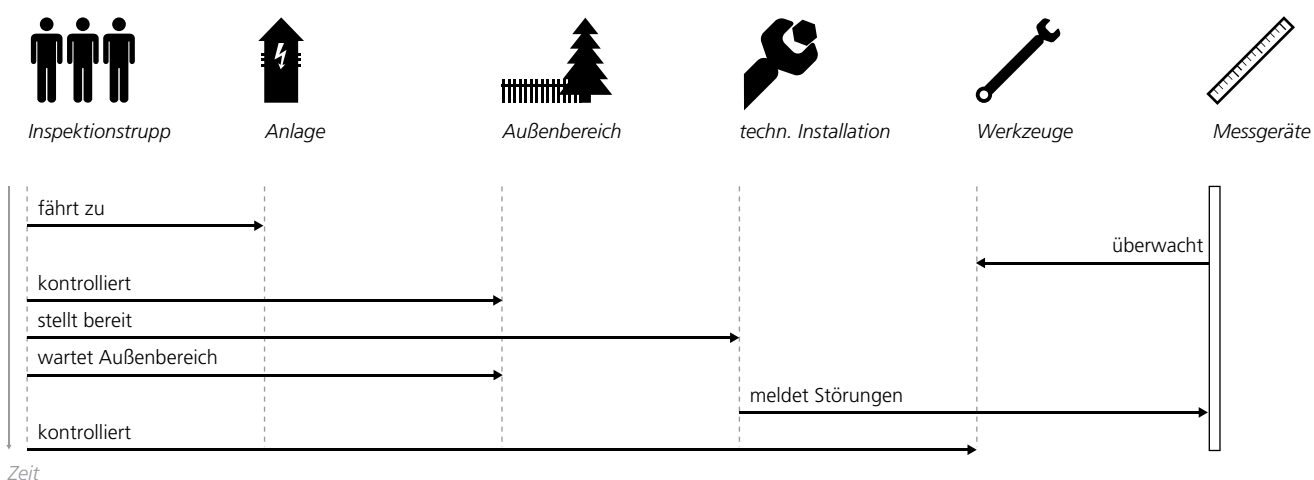


Abb. 3-1.3 Sequenzdiagramm manuelle Wartung

1.2 Probleme

- Zeitnahe Alarmierung bei Schadensfällen ist nicht gelöst (bis zu 3 Fehlalarme pro Woche bei konventionellen PIR PersonenInfraRot-Warngeräten)
- Hohe Folgeschäden durch sehr lange Interventionsintervalle (Beschädigungen durch Windbruch oder Bewuchs)
- Bei konventioneller Alarmierung hohe Fehlalarmrate, da nicht nachverfolgbar
- Teilweise hoher Monitoringaufwand durch technische Kontrollen beispielsweise an Umspannungsanlagen (bis zu 3 h pro Einsatz)
- Hohe Kosten durch lange Anfahrtswege (bis zu 100 km)
- Aufwand nicht vorher absehbar und Länge des Arbeitseinsatzes nicht planbar.

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Die automatische Außenwartung gewinnt aus folgenden Gründen zunehmende Bedeutung:

- Mehr Sicherheit durch regelmäßige Wartung/Überwachung in kurzen Intervallen
- Bedarfsweise Fernauslösung der Durchführung einzelner Inspektionsprogramme (zum Beispiel Kontrolle der Einfriedung) oder Bearbeitungsprogramme (zum Beispiel Schneeräumen)
- Geringere Kosten durch lokale Autonomie, keine Anfahrtswege
- Die Durchführung der Außenwartung ist gesichert.
- Normkonforme dokumentierte Überwachung
- Automatische Inspektion technischer Anlagen bei geringen Mehrkosten.



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Die vorgeschlagene Serviceroboter-Lösung ist besonders für die Wartung und Überwachung von Installationen in Versorgungsnetzen geeignet:

- Versorgungsnetze gehören eigenständigen Netzbetreibern oder, bei Wassernetzen, kommunalen oder privaten Versorgern
- In der Wasserversorgung gibt es mehrere tausend Betreiber in Deutschland
- Im Bereich Energieversorgung gibt es neben den vier transnationalen Netzbetreibern mehrere hundert regionale Netzbetreiber
- Verantwortlich für die Wartung sind immer die Eigentümer der Netze
- Wartung und Inspektion für Netzinfrastruktur wird überwiegend von externen Dienstleistern übernommen
- Einschlägige Richtlinien, wie zum Beispiel die DIN 31051, verpflichten zu umfassenden Inspektionen und Wartungen von Netzwerkinstallationen
- Hoher Druck zur effizienten Außenwartung wegen hoher Kostenanteile am Netzbetrieb
- Zunehmende Liberalisierung der Netze verschärft den Kostendruck
- 35% der Betriebskosten (außer Abschreibungen) entstehen für Wartung und Inspektion von Außenanlagen
- Ausfälle wegen mangelnder Wartung haben hohe Kosten zur Folge; unkontrollierter Bewuchs (Äste in den Zuführungsleitungen) an Schaltanlagen können neben Sachschäden in Höhe von 50 000 Euro auch erhebliche Ausfallkosten für die Energielieferung bedeuten.

1.4.2 Einsatzbereich

Der beschriebene Serviceroboter ist technisch auch für andere Geländepflegeaufgaben im privaten und kommunalen Bereich geeignet. Allerdings muss die hier beschriebene vollautomatische Ausführung auf den Einsatz in eingefriedeten, nicht ständig mit Personen besetzten Anlagen begrenzt sein. Natürlich werden die Roboter auch in Kooperation mit dem Wartungspersonal eingesetzt. Die Einfriedung ist nur aus rechtlichen Gründen notwendig. Andernfalls, zum Beispiel in Parks oder privaten Gärten, muss die Sicherheit von Personen durch eine permanente Überwachung sichergestellt werden.

- Einsatzbereich des Serviceroboters sind in erster Linie eingefriedete, überwachungsbedürftige Außenanlagen, die weit entfernt von urbanem Gebiet liegen und nur schwer zugänglich sind.
- Besondere Bedeutung haben Außenanlagen mit umfangreicher Technikausstattung wie Umspannwerke und Gasverteilungen.
- Daneben gibt es weitere Einsatzbereiche in der Industrie, bei denen weiträumige, sicherheitskritische Anlagen überwacht werden müssen. Dazu gehören große Tankanlagen, Gasspeicher und Siloanlagen.
- Im Bereich der Elektrizitätsversorgung gibt es ca. 1 000 größere Außenanlagen in Deutschland (Schätzung BDEW).



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Die prinzipiellen Funktionen des Serviceroboters sind

- Visuelle Gelände- und Gebäudeinspektion
- Alarmierung im Bedarfsfall
- Grasmahd
- Kehren
- Schnee räumen
- Laub ausblasen
- Überwachung und Inspektion der technischen Installationen.

Ein Serviceroboter für den Außenbereich kann die unterschiedlichsten Funktionen von der Bewachung bis hin zum Schneeräumen haben. Sie hängen stark vom Typ der Anlage ab. Sofern es sich um Netzinfrastruktur (Strom, Gas, Wasser) handelt, ist das Aufgabenfeld homogen, und die meisten Anforderungen können mit der vorgeschlagenen Konfiguration erfüllt werden. Wichtig ist ein möglichst hoher Erfüllungsgrad im individuellen Einsatzfall. Eine wesentliche wirtschaftliche Argumentation ist der Wegfall von langen Anfahrtswegen. Der Serviceroboter bleibt immer am Einsatzort.

Sequenzdiagramm

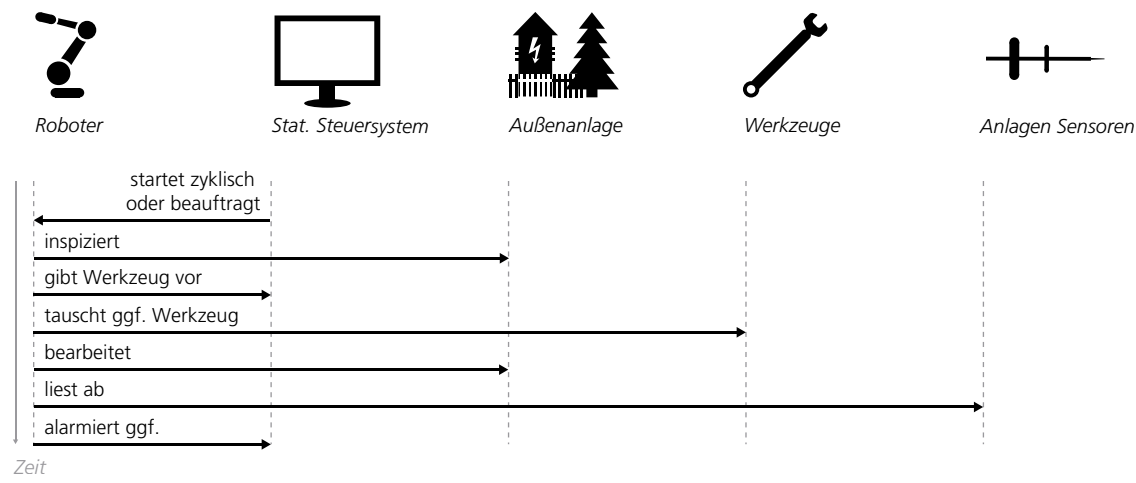


Abb. 3-1.4 Sequenzdiagramm Roboter



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2 Roboterentwurf

Strategie des Roboterentwurfs ist die Kombination von existierenden Modulen wie Industrierobotern, Kamerasystemen und Fahrgestellen zu einem automatisierten Gerät, das für die unterschiedlichen Aufgaben weitgehend automatisch konfiguriert werden kann. Es besteht im Einzelnen aus:

- Geeignete kommerzielle mobile Plattform, zum Beispiel das Fahrgestell eines geländegängigen Kleintraktors für die Landschaftspflege, das mit einem kommerziellen Modul aus der Landtechnik für den automatischen Fahrbetrieb ausgerüstet wird (z.B. John Deere Autotractor, Claas Campilot).
- Modulares Werkzeugsystem für den Roboterarm bestehend aus konventionellen Elektrogeräten, wie Heckenscheren und Kleinsägen, die mit einer Werkzeugwechsellvorrichtung aus der Industrierobotertechnik ausgestattet werden.
- Modulares Anbausystem für die mobile Plattform; dabei handelt es sich um die für den Kleintraktor bereits verfügbaren

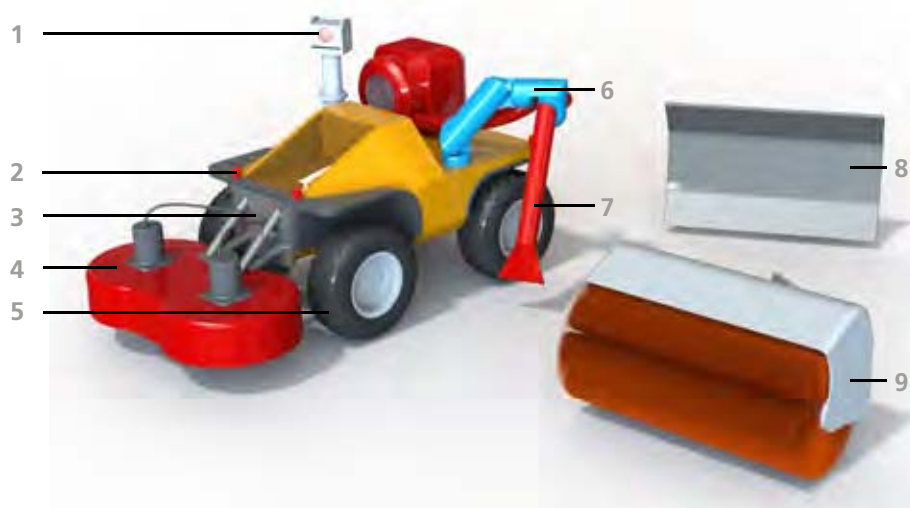
Werkzeuge wie Schneeräumschaufel, rotierende Kehrbürste und Mähwerk, wobei die vorhandene Ankkoppel-einrichtung automatisiert werden muss.

- Standard-Roboterarm, der als Industrieroboter ausgeführt ist, über sechs Achsen verfügt und über einen kugelförmigen Arbeitsraum von etwa 2,5 m Durchmesser verfügt; muss für den Einsatz im Freien geeignet sein.
- Überwachungssensorik, die sowohl Informationen für die Maschine liefert als auch die Bilddaten für die Objektüberwachung und technische Kontrollen.

Das technische Umfeld des Multifunktionsroboters besteht aus:

- Abgeschlossener Unterstand mit fernbedienbarer Tür
- Ablagegestelle für die Bodenwerkzeuge
- Automatische Betankungseinrichtung
- Stationärer Steuerrechner mit Verbindung zum Wartungsnetz über bestehende Kommunikationsverbindung.

Roboterentwurf



- 1 Kamera
- 2 Navigationssensoren
- 3 automatische Kupplung
- 4 Mähwerk
- 5 Geländefahrwerk
- 6 Multifunktionsroboterarm mit automatischem Wechselsystem
- 7 Laubbläser
- 8 Schneeräumschild
- 9 Kehrm modul

Abb. 3-1.5 Multifunktionsroboter



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Zentrale Hardwarekomponenten sind:

- Fahrgestell
- Kamerasystem
- Arm
- Navigationssystem.

Fahrgestell: Für die Erfüllung aller Basisaufgaben (FR 1, FR 2, FR 3) ist ein geländegängiges Fahrgestell erforderlich, das ca. 10 kW Leistung für den Betrieb der Werkzeuge zur Verfügung stellt (FR 2, FR 3). Für den Betrieb mit Fahrer gibt es dafür ein breites Angebot am Markt, das auch modulare Anbauwerkzeuge enthält. Ein geeignetes Gerät mit 20 kW Antriebsleistung kostet etwa 30 000 Euro. Das Gerät muss aber für den automatischen Betrieb umgerüstet werden. Mechatronische Module übernehmen dabei die sonst manuelle

Bedienung und enthalten auch die Winkelgeber für die Odometrie. Sie sind Schnittstelle zum Steuerrechner. Diese Module sind aus der Agrartechnik bekannt (z.B. John Deere ITRAC). Inklusive Einbau und Anpassung an die Steuerung kosten sie ca. 15 000 Euro.

Kamerasystem: Für die Auswahl des Kamerasystems für FR 1 ist vor allem die Eignung für den Einsatz im Freien wichtig. Dafür ist eine Standard Stiftkamera mit Nachtsichtfunktion geeignet (z.B. Profi-Vario-Focus 520 TVL, Sony, 189 Euro). Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass zwei Bewegungsmodule aus der Robotik eingesetzt werden und zwei Kameras zur Einhäusung nach IP67 geeignet sind. Die Kosten dafür betragen etwa 15 000 Euro.

Roboterarm: Für den Arm kann ein üblicher Roboterarm in IP67 eingesetzt werden. Kennwerte sind dabei:

- 6 DOF
- Traglast mindestens 10 kg

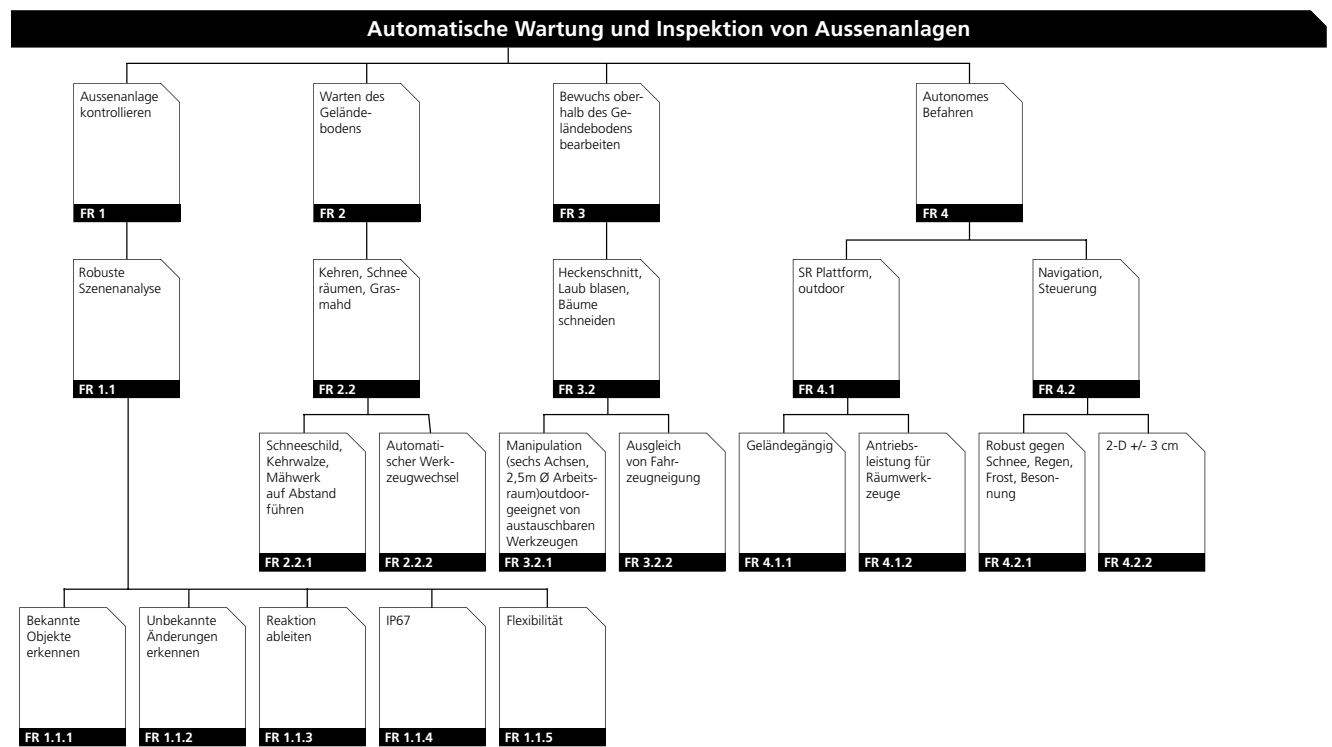


Abb. 3-1.6 Axiomatic Design – Functional Requirements



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

- Genauigkeit: TCP/Bahn +/- 20 mm

Solche Roboterarme kosten ca. 40 000 Euro

Navigationsensoren: Für die verschiedenen Anforderungen werden Ortungssysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften benötigt. Dies liegt daran, dass der Untergrund nicht eben und variabel ist in Bezug auf Stabilitätseigenschaften. So werden für reine Kamerafahrten (FR 1) keine wesentlichen Funktionsbeeinträchtigungen erwartet, wenn sich die Ortung auf 2-D mit einer Genauigkeit von +/- 1 cm beschränkt. Auch für die Bodenbearbeitung reicht 2-D aus. Der Betrieb des Roboterarms (FR 3) erfordert zusätzlich Information über Position und Lage der Plattform (4-D). Prinzipiell wäre ein relativ messendes, auf Landmarken basierendes System, wie es für die indoor-Robotik verwendet wird, geeignet, alle Anforderungen zu erfüllen. Leider sind die dafür notwendigen Laserscanner

bei Messungen über 10-20m derzeit störanfällig gegen Witterungseinflüsse wie Regen oder Schnee. Falls dieses Problem gelöst wird, kann man die systembedingt nicht verfügbaren Winkelinformationen (roll und pitch) über Inklinationssensoren ergänzen. Für Navigation und Ortung im Freien wird üblicherweise absolutes GPS verwendet. Normales Navigations-GPS ist allerdings zu ungenau (+/- 2 m) und es müssen Differentialverfahren eingesetzt werden. Heute verfügbare Systeme (John Deere Autotrak) sind für diese Fahranforderungen (FR 1.1, FR 2.1) einsetzbar. Für die Realisierung der Armfunktionen (FR 3) muss das Lokalisierungssystem (4-D) umfangreicher sein. Die Informationen über Lagewinkel können aus einem Inklinationssensor auf der mobilen Plattform gewonnen werden. Insgesamt muss mit mindestens 100 000 Euro Hardwarekosten für einen Multifunktionsroboter gerechnet werden.

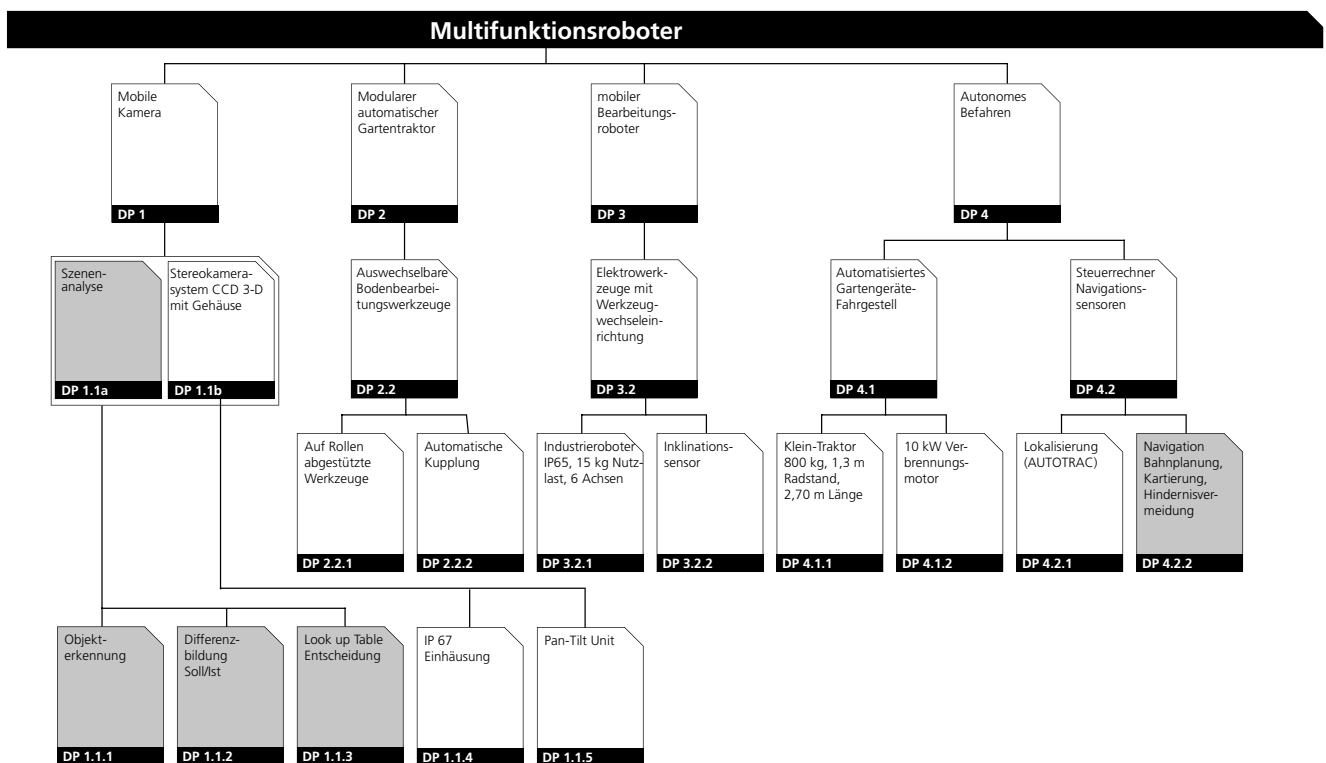


Abb. 3-1.7 Axiomatic Design – Design Parameters



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.2 Software

Konzeptionell ist der Multifunktionsroboter ein vollständig ausgebauter Serviceroboter mit allen extrovertierten und introvertierten Funktionen. Es werden Funktionen aus folgenden Bereichen benötigt:

- Navigation
- Roboter
- Kamera
- Kommunikation
- Modellierung
- Planung.

Damit werden folgende Aufgaben erfüllbar:

- Zustandsüberwachung der Außenanlage. Kontrolle auf Beschädigungen, Verschmutzungen, Bewuchs und Schneeanstimmungen auf den Zugängen.

- Generierung geeigneter Maßnahmen (Entscheidungsmodul).
- Detektion von Gefahrensituationen, unberechtigtes Eindringen, Beschädigung von außen, Feuer, Überschwemmung.
- Generierung von Alarmmeldungen.

In naher Zukunft werden auch Robotersysteme zur Verfügung stehen, die über die Stereokamera Lokalisierung und Fahrbetrieb ermöglichen (CLAAS Campilot). Für die Überwachungsfunktion braucht systemtechnisch keine Software vorgesehen werden. Die Auswertung der Bilddaten kann offline und entfernt beispielsweise in einem bereits dafür ausgerüsteten Gebäude erfolgen. Geeignete Software ist verfügbar (z. B. Kiwisecurity). Die Kosten für die Software bestehend aus Modulen für die Robotik, Outdoor-Navigation und Spezialfunktionen werden auf 1,5 Mio Euro geschätzt.

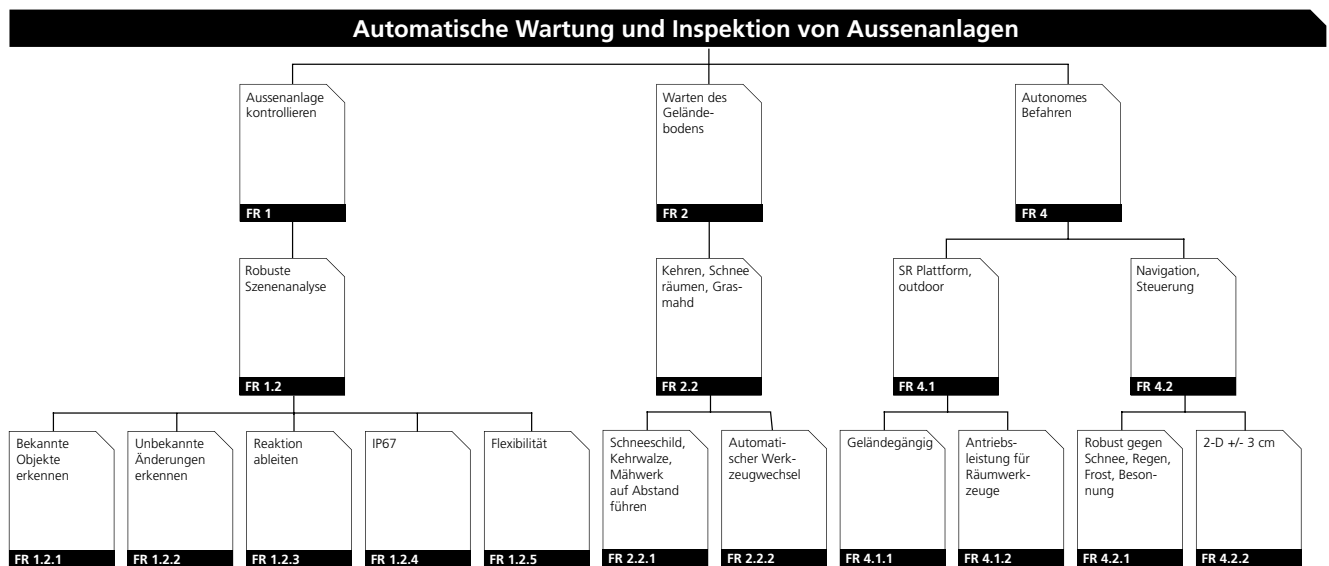


Abb. 3-1.8 Axiomatic Design – Functional Requirements SR-Variante B

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

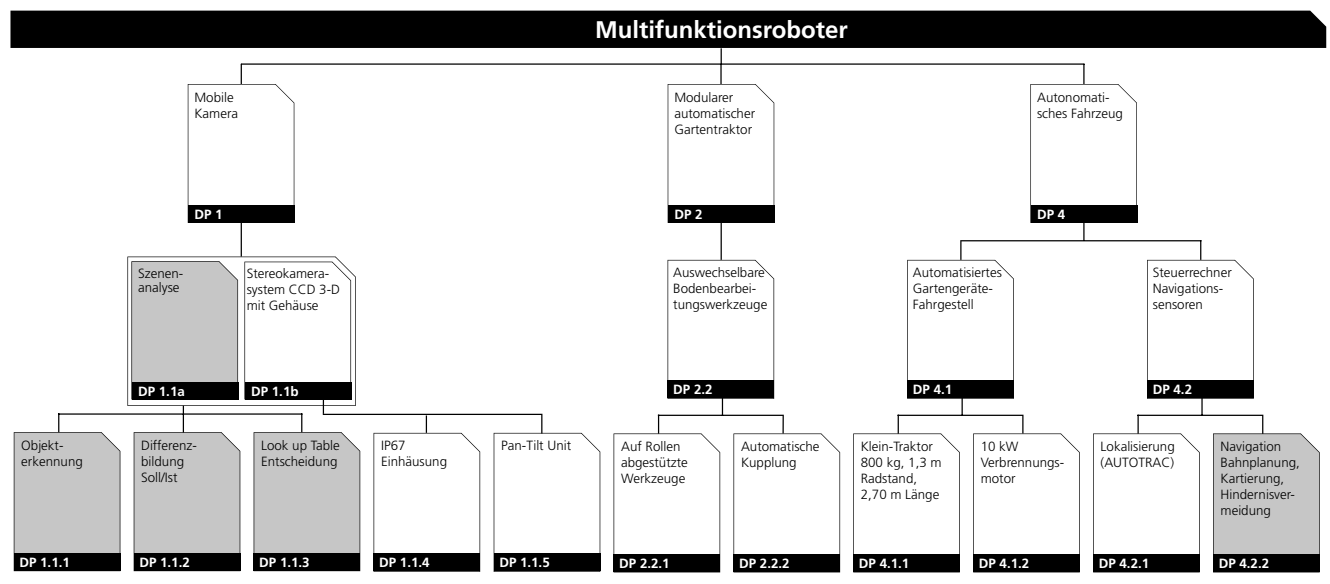


Abb. 3-1.9 Axiomatic Design – Design Parameters für SR-Variante B

2.2.3 Varianten

Nicht alle Außenanlagen sind derart mit hohem Bewuchs ausgestattet, dass eine regelmäßige Bearbeitung erforderlich ist. Vor allem im Bereich der Stromversorgung werden die meisten Anlagen schon bei der Errichtung großflächig ausgerodet, weil hoher Bewuchs ein großes Risiko für die stromführenden Anlagenteile darstellt. Als Variante (SR-Variante B) bietet sich deshalb an, auf die Funktion FR 3 zu verzichten und damit auf die Design Parameter DP 3. Insgesamt kann man dabei den Roboterarm einsparen und auch die entsprechenden Werkzeuge (ca. 50 000 Euro insgesamt). Auch die damit verbundenen Softwaremodule müssen teilweise nicht implementiert werden (ca. 40 000 Euro Softwareentwicklungsaufwand).



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.1.1 Objekterkennung	bekannte Objekte bei natürlicher Beleuchtungsvariation	DP 1.1.1 Erkennungssoftware für den Objektschutz		9	2	Funktion lässt sich auch mit Fernüberwachung realisieren
FR 1.1.2 Änderungserkennung	Szenenvergleich auf Änderung	DP 1.1.2 Vergleichende Bildanalyse		8	2	Funktion lässt sich auch mit Fernüberwachung realisieren
FR 1.1.3 Entscheidungsfindung	zuverlässige Bewertung von Änderungen	DP 1.1.3 einfacher Reasoner		7	2	Funktion lässt sich auch mit Fernüberwachung realisieren
FR 1.1.4 Eignung für Aussenbetrieb	IP 65	DP 1.1.4 IP 67 Einhäusung für Stereokamera	400 € (Sony)	9	2	
FR 1.1.5 Flexibilität	2 Achsen	DP 1.1.5 Pan-tilt unit	200 €	9	2	
FR 2.2.1 Bodenbearbeitung	automatisierbare Hub/Senk Einrichtung	DP 2.2.1 Rollenführung für Bodenbearbeitungswerkzeuge	1.000 €	9	2	
FR 2.2.2 Werkzeugwechsel	Aktive Kupplung	DP 2.2.2 automatische Werkzeugkupplung	1.000 €	8	2	
FR 3.2.1 Manipulation von austauschbaren Werkzeugen	6 Achsen	DP 3.2.1 Industrieroboter	20.000 €	9	1	nicht für SR-Variante B erforderlich
FR 3.2.2 Fahrzeugneigung	+/- 3 grad	DP 3.2.2 Inklinationssensor	100 €	9	1	nicht für SR-Variante B erforderlich
FR 4.1.1 Geländegängigkeit	automatisiertes kommerzielles Fahrgestell	DP 4.1.1 Kleintraktor	20.000 €	8	3	Hakotrack 1950da
FR 4.1.2 Leistung für Bodenbearbeitung	10 kW	DP 4.1.2 Verbrennungsmotor	s.o.	8	3	
FR 4.2.1 robuste Lokalisierung	+/- 3cm	D 4.2.1 Lokalisierung (Autotrac, John Deere)	15 000 €	9	3	geschätzter Komponentenpreis
FR 4.2.2 2D-Navigation		DP 4.2.2 Bahnplanung, Kartierung, Hindernisumfahrung (Claas Campilot)		9	2	

Tab. 3-1.1 Komponentenübersicht



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Manuelle Alternative	
Grunddaten Use Case						
• Lebensdauer (a)		10		10		10
• Anzahl Roboter (System)		1		1		-
• Produktivzeit (h/a)	8.299,2		8.299,2		312	
• Personalstunden (h/a)		0		0		312
• Abgefragte Serviceleistung (h/a)*		104		104		104
LCC-Summe (T€)	314,0	100,0%	250,6	100,0%	168,9	100,0%
• Investition	200,2	63,8%	149,5	59,7%	20,0	11,8%
• Installationskosten	8,0	2,5%	8,0	3,2%	0,0	0,0%
• Aktivitätskosten	42,1	13,4%	42,1	16,8%	138,5	82,0%
• Wartung/Instand.	63,7	20,3%	51,0	20,4%	10,5	6,2%
• Andere		-		-		-
DCF (@10%, T€)	-273,2		-214,7		-111,5	
Softwarekosten (T€)	1.500,0		1.460,0		-	
Leistungskosten (€/h)	301,9		241,0		162,41	

*Tatsächlicher Bedarf an Wartungen (52 Wochen, 2/Woche)

Tab. 3-1.2 LCC

Erläuterung zu Tabelle 3-1.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tab. 3-1.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Serviceroboter-Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Systems ausgegangen (52 Wochen, 24 Stunden täglich) – zum Betrieb sind keine weiteren Personen notwendig. Im Regelfall fällt pro Woche ein Einsatz für Kontroll- und Wartungsarbeiten an (z.B. Visuelle Kontrolle der Umfriedung, Anlage, Mähen, Laub)¹. Die Einsatzdauer wird mit 2 h veranschlagt, so dass sich ein

Leistungsbedarf von 104 h/a ergibt. Die Verfügbarkeit des Systems wird mit 95% angesetzt, so dass die effektive Produktivzeit 8 299 h/a beträgt – sie hat allerdings keine Auswirkung auf die Leistungsverfügbarkeit.² Das Serviceroboter-System vermeidet Fehlalarme.

Manuelle Alternative: Keine Änderung.

Investition: Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten von 124 Tsd Euro pro Serviceroboter sowie der notwendigen Systemperipherie zu 30 Tsd Euro (Unterbringung, Nebeninstallationen) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

Manuelle Alternative: Die Kosten für die notwendigen (manuellen) Werkzeuge werden mit 20 Tsd Euro angesetzt.

¹ Dies ist eine vereinfachende Annahme und orientiert sich an den in der manuellen Variante und in der Praxis anfallenden Aufwände (Erfahrungswerte, Interviewangabe). Sie dient lediglich der Vergleichbarkeit der Alternativen und berücksichtigt nicht, dass ein Serviceroboter natürlich auch häufiger und vor allem auch bedarfsgesteuert eingesetzt werden kann. Vgl. dazu auch [Kapitel 3.1.5](#).

² Aufgrund des geringen Leistungsbedarfs von 104 h/a im Vergleich zur Verfügbarkeit 8299 h/a sowie der Tatsache, dass die Leistung nicht zu einem genauen Zeitpunkt erfolgen muss, wird der technische Ausfall keine Auswirkung auf die zu erbringende Leistung haben.



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Installationskosten: Sowohl für die Planung und (Erst-) Einrichtung des Systems als auch für die Schulung wird jeweils ein externer Personalaufwand von 5 PT (40 Ph) angesetzt. Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen (100 Euro/Ph).

SR-Variante B: Keine Änderung.

Aktivitätskosten: Der Energieverbrauch beträgt im Durchschnitt 0,3 l Diesel pro Stunde während der Produktivzeit (2 489,8 l/a)³ die Energiekosten werden mit 1 Euro/l veranschlagt. Weitere Betreuungskosten fallen durch die Reinigung/ Bestückung/Prüfung der Serviceroboter-Werkzeuge an (1 h/4 Wochen; beinhaltet nicht die technische Wartung; 2 h Hin-/Rückfahrt). Insgesamt ergibt sich dadurch ein Betreuungsaufwand von 39 h/a. Diese Arbeiten werden in den Nebenzeiten durch Techniker durchgeführt (34 Euro/h). Jede Fahrt wird mit Sachkosten von 30 Euro angesetzt (390 Euro/a).⁴

Manuelle Alternative: In der manuellen Alternative wird angenommen, dass die Techniker des Betreibers die Anlage nur zum Zwecke der Wartung (1 Einsatz à 2 h/Woche) und im Falle von Fehlalarmen besuchen (1 Fehlalarm/Woche). Bei einer Hin- und Rückfahrtdauer von insgesamt 2 h ergibt sich ein Gesamtaufwand von 312 h/a. Da die Techniker mehrere Anlagen besuchen, werden deren Kosten hier zu 34 Euro/h angesetzt und verrechnet (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten). Jede Fahrt wird mit Sachkosten von 30 Euro angesetzt (insgesamt 3 120 Euro/a).⁵

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt (einmal je Quartal; einmal ungeplant; jeweils 1 PT. Diese Arbeiten werden in den Nebenzeiten durch Techniker im Rahmen der „regulären“ Betreuungsaufgaben (siehe oben) durchgeführt (34 Euro/h;

keine Fahrtkosten) – anfallende Sachkosten werden auf 2,5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

Manuelle Alternative: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 2 PT (16 h) pro Jahr veranschlagt (einmal je Quartal; jeweils nur 0,5 PT, da nicht so komplexe Systeme). Diese Arbeiten werden in den Nebenzeiten durch Techniker im Rahmen der „regulären“ Betreuungsaufgaben durchgeführt (34 Euro/h; keine Fahrtkosten) – anfallende Sachkosten werden auf 2,5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik (s. [Kapitel 2.3.1.2](#)) 1 500 Tsd Euro für SR-Variante A bzw. 1 460 Tsd Euro für die SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

Serviceroboter für den vorgeschlagenen Zweck weisen viele nicht quantifizierbare Vorteile auf. Ihr Einsatz ist deshalb nicht direkt mit der manuellen Ausführung der Funktionen vergleichbar.

- Bei dem vorliegenden Serviceroboter-Anwendungsfall handelt es sich nur bei einem sehr engen Verständnis um eine 100%ige Automatisierungslösung im Vergleich zur manuellen Alternative, d.h. es wurde angenommen, dass der Hauptzweck des Serviceroboters alleine die Übernahme der Wartungsaufgaben ist. Tatsächlich werden diese Aufgaben mit einem Aufwand von 104 h/a im Vergleich zu den 8 299 h/a Gesamtverfügbarkeit eigentlich zu einer Nebenaufgabe (der Rest der Zeit wird für Überwachungs- und Kontrollaufgaben genutzt, die ohne den Serviceroboter praktisch nicht wahrgenommen werden würden). Die manuelle Alternative und die SR-Varianten unterscheiden sich also erheblich in ihren Anwendungspotenzialen und sind damit als Alternativen nur bedingt vergleichbar – dies sollte bei den folgenden Vergleichen berücksichtigt werden.
- **Kostenstruktur:** Die Anschaffungskosten des Serviceroboters machen fast zwei Drittel der Lebenszykluskosten aus (63,8%), gefolgt von den Wartungskosten mit 20,3% – die Bedeutung der Aktivitätskosten ist mit einem Anteil von

³ Der Roboter ist nicht die ganze Zeit im „Vollbetrieb“. Die Erfahrung mit ähnlichen Anwendungen zeigt, dass der Dieserverbrauch in der Regel bei 50 l/Woche liegt.

⁴ 100 km; Kostensatz 0,30 Euro/km

⁵ $52 \cdot (1+1) \cdot 30 \text{ Euro}$.





01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

13,4% relativ gering. Eine Reduzierung der Anschaffungskosten könnte somit einen potenziellen Hebel für eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit darstellen.

- **Wirtschaftlichkeit:** Nach der vorliegenden LCC-Betrachtung sind die Serviceroboter-Varianten hinsichtlich ihrer Leistungskosten bezogen auf die tatsächlich abgefragte Leistung (hier 104 h/a) deutlich teurer als die manuelle Alternative (301,9 Euro/h vs. 162,41 Euro/h). Auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF stehen die Serviceroboter-Varianten in der konzipierten Konfiguration deutlich ungünstiger dar (-273,2 vs. -111,5 Tsd Euro).⁶ Bezüglich der laufenden Kosten ist die SR-Variante B zwar günstiger (105,8 Tsd Euro vs. 149,0 Tsd Euro) – eine Amortisation der Investition ist damit aber innerhalb der Lebensdauer nicht möglich.⁷
- **Sensitivität:** Aufgrund der Kostenstruktur kommen als für eine Sensitivitätsanalyse relevante Parameter hier insbesondere die im Jahr benötigte Wartungsleistung (siehe Mengengerüst) sowie die Anschaffungskosten der Serviceroboter in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Varianten gleichmäßig und proportional oder sind im Vergleich zu ihrem Gewicht bezüglich der Aktivitätskosten irrelevant):
 - Bei einer Halbierung der Anschaffungskosten der Serviceroboter (von 124 Tsd Euro auf 62 Tsd Euro) würden die Leistungskosten noch bei 205,3 Euro/h liegen. Sie bieten somit keinen Hebel, die Wirtschaftlichkeit weiter zu verbessern.
 - Unterstellt man, dass pro Woche anstatt einem zwei Wartungseinsätze durchgeführt werden müssen (Leistungsbedarf 208 h/a; 104 Einsätze + 52 Fehlalarme in der manuellen Variante), so steht die SR-Variante mit Prozesskosten von 151,0 Euro/h immer noch teurer da als die manuelle Alternative (123,08 Euro/h). Bezüglich

der laufenden Kosten würde die SR-Variante im Vergleich zur manuellen Alternative zwar zu einer Ersparnis von 130,27 Tsd Euro führen, sie würde aber nicht für eine Amortisation der Investition ausreichen.⁸ Dennoch gilt in der Tendenz, dass die Serviceroboter-Lösung mit zunehmender Anzahl der Einsätze (inklusive Fehlalarme) wirtschaftlicher wird. Eine Weiterentwicklung des Szenarios bzw. der Serviceroboter-Technologie hat demnach durchaus ein wirtschaftliches Potenzial.

3.2 Nutzwert

Der Nutzwert des vorgeschlagenen Serviceroboter-Konzepts wird vor allem durch die wesentlich erweiterte Funktionalität der Wartung von Aussenanlagen bestimmt:

- Die Anlagenüberwachung ist verbessert. Dadurch werden Schäden und Beschädigungen vermieden.
- Es können ferngesteuerte Überwachungen für die Alarmverfolgung durchgeführt werden. Deshalb können die Kosten für Fehlalarme gespart werden.
- Es muss kein technisches Wartungspersonal für vergleichsweise einfache Gärtnerarbeiten eingesetzt werden.
- Die Anlagen müssen nicht mehr regelmäßig angefahren werden, sondern nur noch bei technischem Interventionsbedarf.

⁶ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

⁷ Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante = $(138,5+10,5) - (42,1+63,7) = 43,2 \ll (200,2+8,0)$.

⁸ Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante A = $(225,55+10,45) - (42,09+63,69) = 130,27 \ll (200,20+8,00)$.



AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Energie- und Wasserversorgung“

Statistisch wird der Markt „Energie und Wasserversorgung“ hier auf Basis der Wirtschaftszweige „Elektrizitäts-“, „Gas-“ und „Wasserversorgung“ (WZ 35.1, 35.2, 36.0) sowie der „Abwasserentsorgung“ (WZ 37.0) abgegrenzt.⁹ Wesentliche Strukturdaten fassen Tab. 3-1.3 und Tab. 3-1.4 zusammen.

	Elektrizität	Gas	Wasser	Abwasser
Unternehmen	1 122	247	1 710	1 260
Beschäftigte	195 207	16 551	41 129	32 359
Umsatz (Mio €)	284 654	67 445	10 179	8 147
Investitionen (Mio €)	8 326	1 132	2 404	2 324
Investitionen (in Prozent am Umsatz)	2,9%	1,7%	23,6%	28,5%

Tab. 3-1.3 Strukturdaten „Energie- und Wasserversorgung“ 2008¹⁰

9 Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de)

10 Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de)

2008 zählte der Markt „Energie- und Wasserversorgung“ mehr als 4 300 Unternehmen, die mit ca. 285 000 Beschäftigten einen Umsatz von mehr als 370 Mrd Euro erwirtschafteten.

Betrachtet man die Verteilung der Unternehmen nach Größenstrukturen in diesem Markt (vgl. Tab. 3-1.4), so unterscheiden sich diese je nach Teilmarkt deutlich voneinander. Während im Bereich der Energieversorgung große Unternehmen (50 und mehr Mitarbeiter) jeweils mehr als ein Drittel aller Unternehmen ausmachen, so sind die Teilmärkte Wasserversorgung/Abwasserentsorgung deutlich weniger konzentriert: Hier machen Großbetriebe jeweils weniger als 10% aus – Kleinstbetriebe (weniger als 10 Mitarbeiter) stellen dagegen mit einem Anteil von jeweils mehr als 60% die mit Abstand größte Gruppe dar.

Mitarbeiter	Elektrizität	Gas	Wasser	Abwasser
0 – 9	351	102	1 086	800
10 – 19	99	28	256	241
20 – 49	210	48	209	128
50 – 249	318	69*	139	64
250 – und mehr	144	–	20	27

* Geschätzt. Keine detaillierten Zahlen für 50 und mehr verfügbar

Tab. 3-1.4 Größenstrukturen „Energie- und Wasserversorgung“¹¹ 2008

Investitionsverhalten:

Wie schon Tab. 3-1.3 entnommen werden kann, scheinen die Teilmärkte Wasserversorgung/Abwasserentsorgung gemessen an den Investitionsquoten am Umsatz mit jeweils deutlich über 20% wesentlich kapitalintensiver zu sein als die Teilmärkte Energie- und Gasversorgung mit jeweils weniger als 3% Investitionen am Umsatz. Detaillierte Daten zum Investitionsverhalten im Gesamtmarkt „Energie- und Wasserversorgung“ können Tab. 3-1.5 entnommen werden.

11 Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de)

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 4 MARKTDATEN

Mitarbeiter	Elektrizität	Gas	Wasser	Abwasser
Investitionen insgesamt (Mio €)	8 326	1 132	2 404	2 324
davon in technische Anlagen und Maschinen (Mio €/ Prozent an Gesamtinvestitionen)	7 279/ 87,4%	988/ 87,3%	2 104/ 87,5%	1 994/ 85,5%
nach Mitarbeiter				
0 – 9	220	33	490	555
10 – 19	106	24	224	295
20 – 49	239	134	343	217
50 – 249	1 041	797*	560	345
250 und mehr	5 674	–	487	581
davon in technische Anlagen und Maschinen (in Prozent am Umsatz)	87,4%	87,3%	87,5%	85,8%
nach Mitarbeiter				
0 – 9	1,7%	2,3%	27,6%	29,5%
10 – 19	3,4%	4,5%	29,6%	31,4%
20 – 49	2,3%	2,6%	23,8%	26,4%
50 – 249	1,5%	1,3%	21,3%	25,7%
250 und mehr	3,0%	–	13,6%	18,4%

*Geschätzt. Keine detaillierten Zahlen für 50 und mehr verfügbar

Tab. 3-1.5 Investitionsverhalten „Energie- und Wasserversorgung“ 2008¹²

Insgesamt stellen Investitionen in Maschinen und Anlagen mit einem Anteil von jeweils mehr als 85% an den Gesamtinvestitionen den Schwerpunkt der Investitionstätigkeiten dar. Dabei kann beobachtet werden, dass gerade die kleineren Unternehmen in den einzelnen Teilmärkten (0 – 9 und 10 – 19 Mitarbeiter) deutlich über dem jeweiligen Durchschnitt des Teilmarktes liegen – mit Ausnahme der Betriebe mit weniger als 10 Mitarbeiter im Teilmarkt Elektrizität.

¹² Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de)

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Außenanlagen-Wartung“

In dem hier beschriebenen Serviceroboter-Anwendungsszenario geht es um den Serviceroboter-Einsatz im Bereich der Außenanlagen von Energie- und Wasserversorger (inklusive Abwasserentsorgung), bei dem der Serviceroboter sowohl Wartungs- als auch Überwachungsaufgaben wahrnimmt. In dieser Abgrenzung ist keine weitere Differenzierung/Charakterisierung auf Basis statistischer Daten möglich bzw. sind keine detaillierteren Studien verfügbar.

Beschränkt man sich auf den Robotereinsatz im Bereich der Überwachung, so könnte die Studie „Marktpotenzial von Sicherheitstechnologien und Sicherheitsdienstleistungen“ des VDI/VDE 2009 weiterführende Hinweise liefern:¹³ Dort wurde u.a. das Marktpotenzial von „Systemen, Technologien und Dienstleistungen zum Schutz vor Diebstahl, Einbrüchen und Überfällen inkl. Videosysteme“ untersucht. Aus dieser Studie sind insbesondere zwei Schlussfolgerungen für die Abschätzung der Marktpotenziale des hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsszenarios relevant:

- Zum einen wird festgestellt, dass der Markt für Geländeüberwachungssysteme in Deutschland momentan praktisch keine Relevanz hat und heute weitgehend exportorientiert ist.
- Und zum anderen ist man der Meinung, dass Robotersysteme oder auch mobile autonome Systeme noch am Anfang der Erschließung des zivilen Sicherheitsmarktes in diesem Zusammenhang stehen.

¹³ Vgl. im Folgenden VDI/VDE (2009): „Marktpotenzial von Sicherheitstechnologien und Sicherheitsdienstleistungen“. Schlussbericht. (www.asw-online.de)

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 4 MARKTDATEN

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Serviceroboter-Anwendungsfall bezieht sich ausschließlich auf große Außenanlagen von Energie- und Wasserversorgungsunternehmen. Aus diesem Grund wird auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-1.6):¹⁴

- Statistisch relevante Sektoren sind die Wirtschaftszweige „Elektrizitäts-“, „Gas-“ und „Wasserversorgung“ (WZ 35.1, 35.2, 36.0) sowie „Abwasserentsorgung“ (WZ 37.0).
- Es wird angenommen, dass nur Unternehmen einer bestimmten Größe Außenanlagen betreiben.¹⁵ Gleichzeitig müssen sie in der Lage sein, die für die Serviceroboter-Investitionen notwendigen, finanziellen Mittel aufzubringen. Dies erscheint erst für Unternehmen mit einer Größe von mindestens 50 Mitarbeitern plausibel.¹⁶

¹⁴ Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de).

¹⁵ Wie z.B. Umspannwerke, Gasspeicher, Grundwasserförder- und Aufbereitungsanlagen, Regenrückhalte und Kläranlagen etc.

¹⁶ Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit durch die hier betrachteten Unternehmen. Bei der hier betrachteten SR-Investition sind Mittel in Höhe von mindestens 150 Tsd Euro notwendig. Aufgrund der hohen Kapitalintensität in diesen Branchen wird davon ausgegangen, dass nicht mehr als 5 – 10% der gesamten Investitionssumme für SR zur Verfügung stehen. Erst Unternehmen mit 50 und mehr Mitarbeitern liegen mit ihren durchschnittlichen Investitionen in einer diesem Wert entsprechenden Größenordnung von deutlich über 2 Mio Euro (vgl. Tab. 3-1.4 und Tab. 3-1.5).

Unternehmen	Σ	Elektrizität	Gas	Wasser	Abwasser
davon mit mehr als 50 Mitarbeitern	781	462	69	159	91

Tab 3-1.6 Ableitung des relevanten Zielmarkts¹⁷

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 781 Unternehmen als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-1.7):

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme für Maschinen und Anlagen betrug 2008 9 485 Mio Euro.¹⁸
- Weiterhin wird geschätzt, dass aufgrund der hohen Kapitalintensität maximal 5% für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen (~474,3 Mio Euro).¹⁹
- Jedes Serviceroboter-System besteht aus einem Serviceroboter. Bei einem Systempreis von 200,2/149,5 Tsd Euro (SR-Variante A/B) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~ 2 369/3 173 Servicerobotern führen – was letztlich zu einer Installed Base von 23 690/31 730 im eingeschwungenen Marktzustand führen würde (Lebensdauer 10 Jahre).
- Dies würde allerdings bedeuten, dass im Schnitt mehr als 25 Serviceroboter pro Unternehmen im Einsatz wären, was ebenfalls mindestens 25 geeignete Außenanlagen pro Unternehmen voraussetzt. Dies erscheint nicht als plausibel. Im Folgenden wird daher von 5 geeigneten Außenanlagen

¹⁷ Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de).

¹⁸ Vgl. Tab 3-1.5.

¹⁹ In Ermangelung geeigneter Daten. Es wird davon ausgegangen, dass der Großteil dieser Investitionssumme für den Erhalt und Ausbau bestehender Anlagen aufgewendet werden muss – sie also notwendige Investitionen darstellen, auf die das Unternehmen nicht „verzichten“ kann. Daher wird ein niedriger SR-Anteil an den Investitionen angesetzt.



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 4 MARKTDATEN

pro Unternehmen ausgegangen, so dass die maximal zu erreichende Installed Base 3 905 Serviceroboter beträgt – bei einer Lebensdauer von 10 Jahren leitet sich daraus ein Absatzpotenzial von ca. 391 Serviceroboter pro Jahr ab. Plausibel erscheint daher eine maximale Anzahl von 5 Servicerobotern pro Unternehmen, so dass die errechneten, jährlichen Absatzpotenziale entsprechend auf ca. 391 Serviceroboter korrigiert werden.

- Aber selbst diese Werte sind nur als obere Grenzen für das Marktpotenzial zu sehen – ihr Erreichen setzt immer noch eine nach den Maßstäben der Branche positive Wirtschaftlichkeitsbetrachtung voraus. Aufgrund der negativen LCC-Betrachtung der hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsfelder kann das hier errechnete Marktpotenzial nur langfristig und nur unter der Voraussetzung signifikanter Optimierungen hinsichtlich der Lebenszykluskosten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Diese scheint heute nur für wenige, geeignete Außenanlagen, die eine entsprechend hohe Auslastung erreichen, gegeben. Geht man davon aus, dass dies heute für 10% der Anlagen zutrifft, dann ergeben sich unter Berücksichtigung der wie oben korrigierten Werte jährliche Absatzpotenziale von 39/39.

Relevante Betriebe	~781
Brutto Investitionssumme in Maschinen u Anlagen (T€)	~9 485 000
davon SR Investitionen (T€)	~474 250
Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR Systempreis T€ 200,2 / 149,5; 1SR pro System)	
• errechnet	~2 369 / 3 173
• real (max. 5 SR pro Unternehmen)	~391 / 391
• real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~39 / 39
Errechneter max Bestand an SR (10 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
• errechnet	~23 690 / 31 730
• real (max. 5 SR pro Unternehmen)	3 905 / 3 905
• real (max. 5 SR pro Unternehmen; unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~391 / 391

Tab. 3-1.7 Ableitung des Marktpotenzials (Eigene Schätzungen)





AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

Insgesamt kann die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nur die derzeitige Situation in der Wartung von Außenanlagen betrachten. Mittelfristig wird sich der Bedarf für automatisierte Lösungen aber weiterentwickeln; vor allem in den Energienetzen werden künftig weitergehende Anforderungen an Sicherheit und Effizienz gestellt werden:

- Die LCC-Betrachtungen haben gezeigt, dass die SR-Varianten aus einer wirtschaftlichen Sicht im Moment noch keine ernstzunehmende Alternative zur aktuell üblichen, manuellen und bedarfsorientierten Wartung der Außenanlagen darstellt. Erst mit zunehmender Einsatzhäufigkeit werden beide Alternativen auf Basis ihrer Kosten vergleichbar.
- Diese Aussagen betreffen aber nur das hier zwecks Vergleichsrechnung unterstellte, enge Einsatzszenario. Berücksichtigt man dagegen, dass der Serviceroboter im Prinzip ganzjährig, 24 Stunden in Bereitschaft ist, so ergeben sich vollkommen neue Aufgaben, deren Nutzen in der hier durchgeführten Vergleichsrechnung nicht quantitativ bewertet werden konnten: Zum einen kann der Serviceroboter schneller und öfter „ungeplante“ Inspektionsaufgaben übernehmen – die höhere Inspektionshäufigkeit kann ggf. Schäden zu vermeiden helfen, die bei ihrem Auftreten teurer sind als die Leistungskosten des Roboters (umgelegt auf seine Verfügbarkeit betragen die Leistungskosten gerade einmal 3,78 Euro/h).²⁰ Auch würde eine ganzjährige Überwachungsleistung zur Verfügung stehen. Dies wäre ein entscheidender Vorteil gegenüber der heute üblichen intervall- und bedarfsgesteuerten Wartung durch Einsatzteams der Betreiberunternehmen.
- Vor diesem Hintergrund kann zwar insgesamt nur mit einer mittelmäßigen Marktakzeptanz der Serviceroboter gerechnet werden, da sie sicher nicht für alle Außenanlagen von Energie- und Wasserversorgungsunternehmen eine wirtschaftliche Lösung darstellen (vgl. [Kapitel 3.1.3.1.2](#) und [Kapitel 3.1.4.2.2](#)).

- Insgesamt wird daher mit einer geringen Ausschöpfung der Marktpotenziale im Rahmen der Ausführungen von [Kapitel 3.1.4.2.2](#) gerechnet.
- Allerdings sollte beachtet werden, dass der hier für die Serviceroboter abgegrenzte Markt relativ eng gefasst ist (nur Energie- und Wasserversorger). Einsatzszenarien böten sicher auch große Industrieanlagen mit einem hohen Sicherheitsbedarf und hohen Zuverlässigkeitsanforderungen – z.B. in der chemischen Industrie – die hier allerdings nicht berücksichtigt worden sind. Das hier ausgewiesene Marktpotenzial ist hier daher als untere Grenze zu verstehen.

5.2 Forschungsbedarf

In diesem Szenario wird dargelegt, dass sich die Aufgaben bei der automatischen Wartung von Außenanlagen prinzipiell mit weitgehend bekannten Technologien der Serviceroboter erfüllen lassen. Einzelne Anwendungsbereiche und verschärfte Anforderungen werden aber nur mit technologischen Innovationen erreicht werden können.

- Bildverarbeitung unter schwierigen Wetterbedingungen (Schnee, Nebel, Regen)
- Sichere Szenenanalyse und Reaktionsmechanismen
- Lokalisierung und Navigation bei schwierigen Wetterbedingungen (s.o.)
- Ex-Schutz für Serviceroboter in Gas- und Tankanlagen

²⁰ Verfügbarkeit von 8 299,2 h/a; Lebenszykluskosten von 313,9 Tsd Euro.





01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

AUSSENANLAGENWARTUNG

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B
Fahrgestell (Traktor)	35,0 T€	35,0 T€
Roboterarm (15 kg Industrietyp)	35,0 T€	–
Navigationsmodul (Claas oder John Deere)	4,0 T€	4,0 T€
Kamera (Stereokamerasystem)	4,0 T€	4,0 T€
Werkzeuge (Bodenbearbeitung + Roboterarm)	10,0 T€	6,0 T€
Sonstige Automatisierungskomponenten	36,0 T€	36,0 T€
Systemperipherie (Unterbringung, Nebeninstallation)	30,0 T€	30,0 T€

Tab. 3-1.8 Anschaffungskosten



SZENARIOSTECKBRIEF

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN



02



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG





BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Die Versorgung der Bewohner im Pflegeheim erfolgt bislang komplett manuell. Dafür führt das Pflegepersonal üblicherweise einen Wagen mit sich, der alle für die Versorgung benötigten Utensilien enthält. Dies betrifft primär Produkte, die für alle Bewohner zur Verfügung stehen.

- Inhalte/Elemente des Pflegewagens sind z.B.:
 - Einmalartikel (Desinfektionstücher, Handschuhe, Verbandsmaterial, Pflaster, Inkontinenzartikel unterschiedlicher Größen),
 - Geräte, z.B. Blutzucker- und Blutdruckmessgerät,
 - Müllbehältnisse,
 - Frische Bettwäsche, Behältnisse für Schmutzwäsche,
 - Getränke für die Bewohner, Ablage für leere Flaschen.
 - Insgesamt werden auf dem Wagen bis zu 50 verschiedene Artikel mitgeführt.
- Anzahl Pflegewagen pro Station: 1 – 2, bei ca. 20 Bewohnern pro Station.
- Kosten eines handelsüblichen, leeren Pflegewagens: ab ca. 800 Euro.
- Individuell verordnetes Verbandsmaterial wird auf den Zimmern gelagert (unterschiedlich je nach Krankenkasse, können z.B. auch Inkontinenzartikel sein, die gleichzeitig für andere Bewohner auf dem Wagen gelagert werden).
- Medikamente werden im Dienstraum des Pflegepersonals gelagert und mit den Mahlzeiten ausgegeben.

Der Materialfluss stellt sich entsprechend der durchgeführten Analyse vor Ort und den durchgeführten Expertengesprächen wie folgt dar:

- Verbrauchsmaterial und Wäsche wird je nach Verbrauch mehrmals wöchentlich (Wäsche) oder alle 4 – 6 Wochen (Windeln, Einmalartikel, Reinigungsmittel) angeliefert und zunächst in einem zentralen Lager bzw. mehreren verteilten Lagerräumen, z.B. im Keller des Heims, aufbewahrt.
- In regelmäßigen Abständen (ein- bis zweimal wöchentlich), werden die benötigten Mengen durch Zivildienstleistende

oder hauswirtschaftliche Mitarbeiter auf Lager auf den Stationen verteilt. Dauer: maximal eine halbe Stunde pro Station, ca. 10 – 15 m² Lagerfläche pro Station, zusätzliche Lagerung im Dienstzimmer (z.B. Reinigungsmittel – müssen unter Verschluss gehalten werden).

- Für die Verteilung der Güter auf die Stationen gibt es ein festes Kontingent, die Stationen können jedoch auch zusätzliche Pflegeutensilien ordern.
- Die Bestückung der Pflegewagen erfolgt üblicherweise nach Beendigung der Schicht durch die Pflegekräfte, Dauer ca. 10 Minuten. Pro Schicht werden 2 Versorgungsgänge durchgeführt, es gibt am Tag 3 Schichten.
- Personal pro Schicht und Station: Tagschicht: 3 MA, Spätschicht: 2 MA, Nachtschicht: 1 MA
- Nach einem Versorgungsgang wird der Wagen üblicherweise erst einmal nicht mehr benötigt (ca. 1 – 2 Stunden tagsüber, 2 – 3 Stunden nachts). In Notfällen sollte er jedoch spätestens innerhalb einer Viertel- bis halben Stunde wieder zur Verfügung stehen.
- Während der Durchführung der Pflegetätigkeit ist es erforderlich, diese zu dokumentieren. Dauer für die Dokumentation bei Pflegefachkräften: täglich mindestens 1 Stunde, Hilfskräfte müssen weniger dokumentieren.
- Die Bedürfnisse der Bewohner bzw. die für einzelne Bewohner benötigten Pflegeutensilien werden mit Hilfe eines Pflegeplanungssystems verwaltet. Bei der Bestückung der Pflegewagen wird dieses nicht berücksichtigt (PC steht im Dienstzimmer, zu hoher Zeitaufwand).



01



02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Sequenzdiagramm

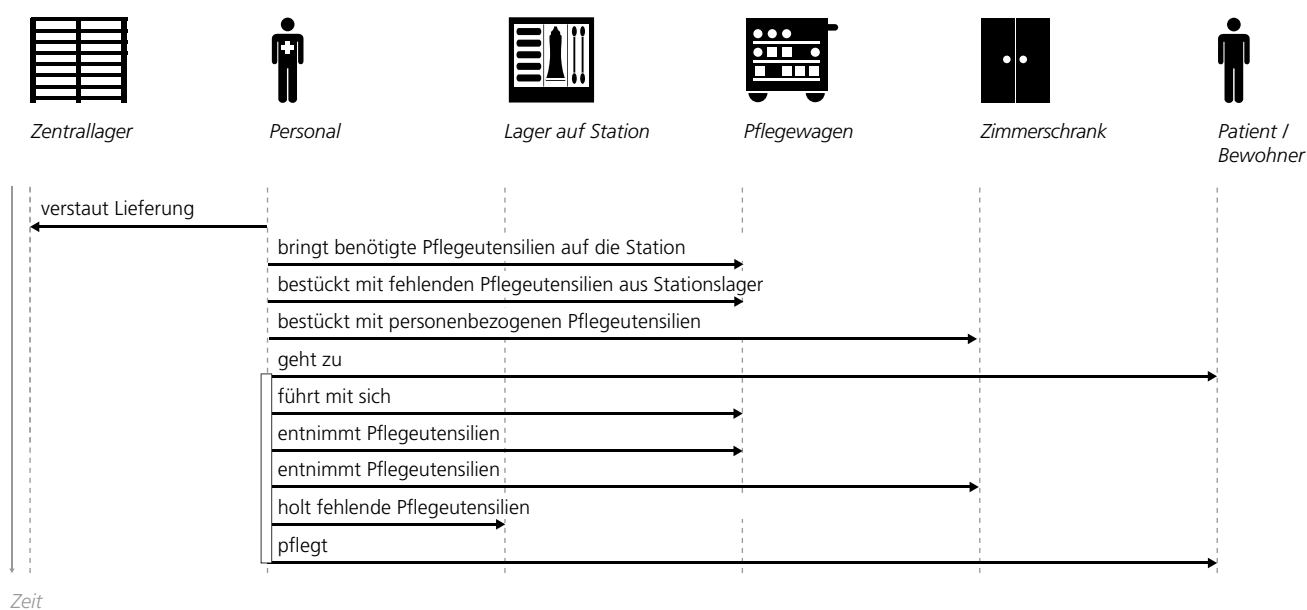


Abb. 3-2.1 Typische Prozesse in der Versorgung

Pflegewagen



Abb. 3-2.2 Handelsübliche Pflegewagen. Quelle links: HINZ Fabrik GmbH, Quelle rechts: Procedo Stocker GmbH, Allershausen.

Lagerraum



Abb. 3-2.3 Typischer Lagerraum im Altenheim



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.2 Probleme

Eines der größten Probleme in der Pflege stellt bekanntermaßen die hohe physische und psychische Belastung der Pflegekräfte dar. Ursachen dafür sind der Personalmangel und die damit verbundene Zeitknappheit bei der Versorgung der Bewohner / Patienten sowie der zunehmende Mangel an Fachkräften. Bis 2050 wird eine Verdreifachung des Bedarfs an professionellen Pflegekräften prognostiziert¹, bei gleichzeitiger Abnahme der Zahl berufstätiger Personen. Durch den Wegfall der Zivildienstleistenden wird die Situation weiter verschlimmert.

Bezüglich der Bereitstellung von Pflegeutensilien treten entsprechend der durchgeführten Analyse vor Ort und den stattgefundenen Expertengesprächen folgende Schwierigkeiten auf, die eine zusätzliche Belastung des Pflegepersonals darstellen:

- Auf dem Pflegewagen fehlende Gegenstände (z.B. Inkontinenzartikel in geeigneter Größe) müssen separat geholt werden. Damit ist ein weiterer Zeitverlust verbunden (bis zu 1 Stunde während einer Schicht, insbesondere bedingt durch lange Laufwege zum Lagerraum).
- Personenbezogene Verbrauchsmaterialien werden im Schrank, allgemeine Verbrauchsmaterialien auf dem Wagen gelagert. Das hat zur Folge, dass das Pflegepersonal benötigte Utensilien mühsam zusammensuchen muss.
- Häufige Unterbrechungen der geplanten regelmäßigen Tätigkeiten, z.B. durch Notfälle. Daraus resultiert ein weiteres Zeitproblem, teilweise sind für den Notfall benötigte Pflegeutensilien nicht auf dem Wagen verfügbar oder der Wagen wurde nicht mitgenommen.
- Hygienevorgaben / -maßnahmen werden als lästig empfunden: regelmäßiges Desinfizieren des Wagens sowie der Hände nach Entnahme aus dem Wagen etc.
- Dokumentation (Pflegetätigkeit und während der Pfllegetätigkeit aus dem Pflegewagen entnommene Pflegeutensilien) wird

als lästig empfunden, wird ggf. vernachlässigt, damit oft auch kein ausreichendes Nachfüllen des Wagens.

Auswirkungen der hohen Belastung der Pflegekräfte:

- Krankenpflegehelfer: Durchschnittlich 25 Krankheitstage pro Jahr (zweithöchste Zahl von allen Arbeitsgebieten).²
- Drei häufigste Ursachen für den Krankenstand: Erkrankungen des Muskel- und Skeletapparates, Erkrankungen der Atmungsorgane und psychische Erkrankungen.³
- Zusätzliche Verschlechterung auch wegen des demografischen Wandels auf Arbeitskräfte-seite, Stichwort „alternde Belegschaft“.
- Berufsverläufe von Pflegekräften sind durch häufige Arbeitsunterbrechungen geprägt, mit zunehmendem Alter nehmen sowohl die durchschnittlichen Beschäftigungszeiten als auch die Unterbrechungszeiten zu.⁴

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Durch den Einsatz von Robotertechnologien bei der Bereitstellung von Pflegeutensilien kann sowohl deren Ausgabe an das Pflegepersonal als auch die Bestückung der Pflegewagen automatisiert werden. Die Automatisierung der Ausgabe der Pflegeutensilien eröffnet folgende Möglichkeiten:

- Lückenlose Dokumentation der entnommenen Gegenstände als Basis für das vollständige Nachfüllen
- Die Anbindung des internen Steuerrechners an das Patientenverwaltungssystem führt dazu, dass alle für die Patienten auf einer Station benötigten Pflegeutensilien bekannt sind.
- Möglichkeit der manuellen Bestückung anhand einer am Wagen angezeigten Liste fehlender bzw. zur Neige gehender Pflegeutensilien oder automatisierte Bestückung.

¹ Studie „Zukunft der Pflege“, Prof. Schnabel, Reinhold, Universität Duisburg-Essen und ZEW. 02.05.07, www.insm.de

² Spiegel-Studie über Fehlzeiten: „Welche Jobs krank machen“, <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/0,1518,705576,00.html>

³ BGW-DAK. Gesundheitsreport 2003, Altenpflege

⁴ Projekt „Berufsverläufe von Altenpfleger/innen“, IWAK, 2009, <http://www.iwak-frankfurt.de/projansprech/Berufsverbleib.htm>



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

- Eindeutige Zuordnung der Pflegeutensilien zu den Patienten ermöglicht auch die Lagerung personenbezogener Gegenstände auf dem Wagen (Voraussetzung: Sicherung gegen Diebstahl / Fehlbedienung, ausreichend Platz auf dem Wagen)
- Vorteile im Bereich der Hygiene: benötigte Pflegeutensilien stehen direkt griffbereit zur Verfügung. Daher kommt die Pflegekraft so wenig wie möglich mit dem Wagen in Kontakt, damit Reduktion lästiger Desinfektionsvorgänge.

Die Automatisierung der Bestückung der Pflegewägen ermöglicht:

- Vollständige Bestückung ist jederzeit sichergestellt
- Zeitersparnis für das Pflegepersonal, da Pflegeartikel nicht mehr manuell zusammengesucht werden müssen
- Platzersparnis (Lagerräume auf Station können vermieden, ggf. zusätzlich als Patientenzimmer genutzt werden).

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Die Anwenderbranche „stationäre Altenpflege“ ist insbesondere durch aktuelle und prognostizierte demografische Entwicklungen geprägt.

- Aktuelle Trends^{5,6}
 - Anteil der über 80-Jährigen wird sich bis 2060 nahezu verdreifachen.
 - Gleichzeitig sinkt der Anteil der Personen im erwerbsfähigen Alter, 2060 werden etwa doppelt so viele Personen im Rentenalter auf 100 Personen im Erwerbsalter entfallen wie heute.
 - Anteil der Pflegebedürftigen an der Gesamtbevölkerung: 2,6% heute; Anstieg bis 2020 auf 3,6% und bis zum Jahr 2030 auf 4,4%

- Aufgrund der mangelnden Zahl an pflegenden Angehörigen wird die Pflege im Heim in naher Zukunft zur häufigsten Versorgungsform werden und nahezu die Hälfte aller Pflegefälle umfassen.
- Alternativ: neue Pflegeformen, die es den Pflegebedürftigen ermöglichen, länger zuhause zu leben. Beispielsweise durch: Wohngemeinschaften, Mehrgenerationenhäuser, Stadtteilentwicklung
- Unterschiedliche Träger von Pflegeeinrichtungen sind zu beachten, daraus ergeben sich unterschiedliche Entscheider bezüglich der Investitionen sowie unterschiedliche Budgets.
- Größe der Pflegeeinrichtungen stark variabel, durchschnittlich leben in einem Heim 60 – 65 pflegebedürftige Personen⁷.
- Größter Kostentreiber sind Personalkosten (ca. 70%), höhere Prozentsätze im ambulanten Bereich (>90%), geringere im Krankenhaus. In stationären Altenpflegeeinrichtungen ca. 20% Sachaufwand.

1.4.2 Einsatzbereich

- Altenheime, Altenpflegeeinrichtungen, ggf. Betreutes Wohnen. Stationäre Einrichtungen, in denen eine Pflegekraft mehrere Bewohner im gleichen Gebäude versorgt. Kaum ambulante Dienste.
- Üblicherweise große Gebäude, behindertengerecht eingerichtet (eben, breite Gänge, Rampen, Aufzüge etc.)
- Zentrale Aufgabe: Sicherstellung einer angemessenen Pflegequalität. Der Medizinische Dienst der Krankenversicherung MDK evaluiert diese in seinen Prüfungen anhand der Zufriedenheit sowie dem körperlichen Zustand der Betroffenen.⁸

⁵ Statistisches Bundesamt 2009, www.destatis.de

⁶ Studie „Zukunft der Pflege“, Prof. Schnabel, Reinhold, Universität Duisburg-Essen und ZEW. 02.05.07, www.insm.de

⁷ Burger, F.; Weber, M.: Deutlicher Zuwachs an Pflegebedürftigen und Pflegeeinrichtungen: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 4/2009, <http://www.statistik-portal.de/>

⁸ MDK – Medizinischer Dienst der Krankenversicherung zum Thema „Pflegequalität“, <http://www.mdk.de/323.htm>



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Der Serviceroboter, in diesem Anwendungsfall ein sog. teilautonomer Pflegewagen, übernimmt die folgenden Aufgaben:

- Zu geeigneten Zeiten, in denen er nicht gebraucht wird: autonome Fahrt zum Zentrallager und Aufnahme der für die Patienten auf einer Station benötigten bzw. fehlenden Pflegeutensilien
- Autonome Fahrt zur Station bzw. zu einem vorgegebenen Zimmer
- Mechanische und hygienische Bereitstellung der benötigten Pflegeutensilien vor Ort und Protokollierung der Entnahme von Verbrauchsmaterialien

Wichtige Randbedingung: Möglichkeit zur manuellen Entnahme der Pflegeutensilien und Steuerung muss immer gegeben sein, z.B. bei Stromausfall.

Der Einsatz des teilautonomen Pflegewagens ermöglicht eine Einsparung der Lagerräume auf dieser Station sowie eine Entlastung des Personals (Transport der Pflegeutensilien auf die Stationen). Allerdings fällt zusätzliche Arbeit für die strukturierte Ablage der Pflegeutensilien im Lager an, die notwendig für die Aufnahme durch den Serviceroboter ist.

Auf den Stationen werden die Laufwege der Pflegekräfte reduziert, indem die Verfügbarkeit der benötigten Pflegeutensilien auf dem Wagen sichergestellt und dieser insbesondere in Notfällen einfach zur Pflegekraft gerufen werden kann.

Sequenzdiagramm

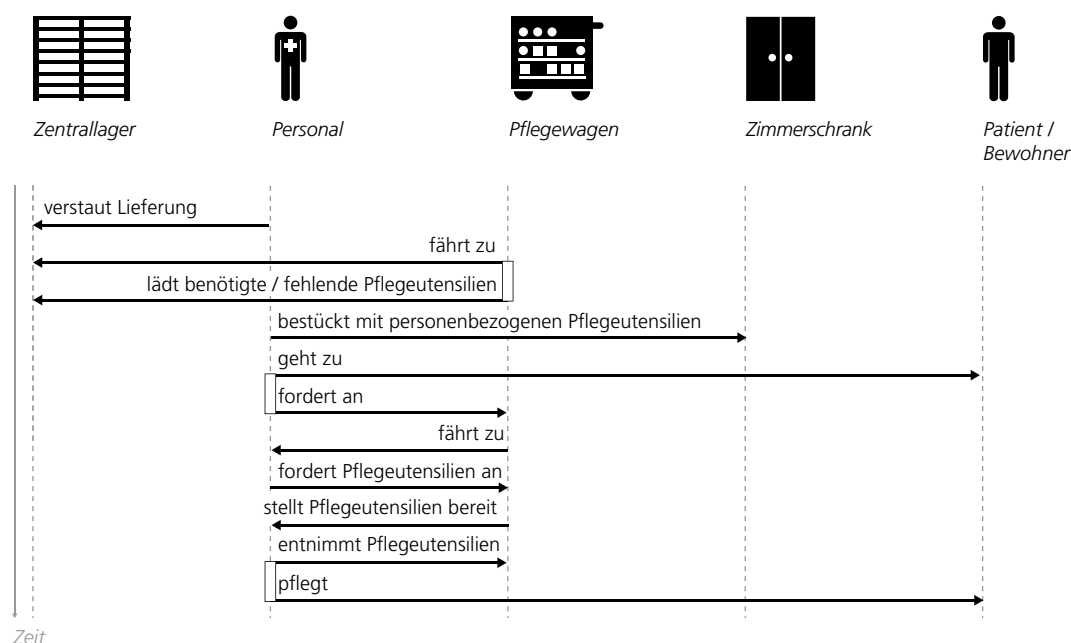


Abb. 3-2.4 Sequenzdiagramm in der Versorgung mit Serviceroboter, hier teilautonomem Pflegewagen

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2 Roboterentwurf

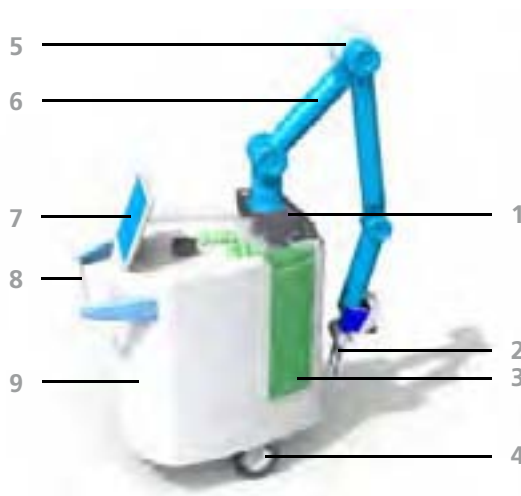
Der Serviceroboter orientiert sich bzgl. Größe und Gesamtaufbau an existierenden Pflegewägen. Eine motorisierte Basisplattform trägt dabei das Magazin für die Pflegeartikel, auf das über einen Entnahmemechanismus einfach zugegriffen werden kann. Für die automatische Bestückung ist der Serviceroboter mit einem Roboterarm und geeigneter Erkennungssensorik ausgestattet.

Schlüsselkomponente für die eigenständige Bestückung des Pflegewagens sind die Motorisierung der Räder, der Roboterarm sowie die für die sichere Navigation und Manipulation benötigten Sensoren. Für die autonome Navigation gibt es bereits ähnliche Lösungen z.B. im Krankenhaus. Kritischer ist aufgrund der Vielfalt der zu manipulierenden Objekte (ca. 50 verschiedene Gegenstände von 10 bis 50 cm Größe, teilweise biegeschlaffe Teile wie z.B. Bettwäsche, Putztücher etc.) und

der großen Verteilung der zu greifenden Gegenstände im Raum (Regale vom Boden bis zu ca. 180 cm Höhe) und der damit verbundenen unterschiedlichen Blick- und Griffrichtungen die Auslegung und Positionierung des Manipulators sowie die Positionierung der Erkennungssensorik zu sehen.

Für die Unterstützung der Pflegekraft vor Ort spielt der Entnahmemechanismus, der möglichst einfach zu bedienen sein muss, eine Schlüsselrolle. Dies betrifft insbesondere die graphische Benutzerschnittstelle und dahinterliegende „Intelligenz“, die ggf. bereits ohne Aufforderung die für die anstehenden Arbeitsschritte benötigten Utensilien bereitstellt. Eine Integration in die Umgebung findet im Rahmen der Datenübertragung vom / zum Stationsrechner statt, des Weiteren sollten alle Türen automatisiert und eine Anbindung an die Aufzugsteuerung möglich sein.

Roboterentwurf



- 1 Linearachse
- 2 2-Finger-Greifer
- 3 Behälter für Abfälle
- 4 Antriebskinematik
- 5 CCD 3D-Kamera
- 6 Roboterarm
- 7 Informationsterminal und User-Interface
- 8 Haltegriff
- 9 Magazin zur Aufbewahrung von Medikamenten und Pflegeutensilien

Abb. 3-2.5 Komponenten des automatisierten Pflege- und Transportwagens



01



02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Im Rahmen des Axiomatic Design (Abb. 3-2.10, Abb. 3-2.11) wird zunächst ein völlig autonomes Servicerobotersystem skizziert. Im Rahmen der Variantenbildung wird eine Möglichkeit zur Reduzierung der Gesamtkosten durch Nutzung eines automatisierten Lagers dargestellt.

Unkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, bereits relativ günstig, nur geringe Skaleneffekte zu erwarten):

- Kommunikationsinfrastruktur WLAN (Weiterentwicklungen münden meist in Leistungssteigerungen statt Kostenreduzierung; langfristig eröffnen sich hier Möglichkeiten, rechenintensive Operationen auszulagern)
- Touchscreen (weiterhin leichter Preisverfall zu erwarten)

Systemkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, nur geringe Skaleneffekte zu erwarten, sehr teuer, deshalb Alternativen dringend nötig):

- Mobile Plattform (ohne exterozeptive Sensoren)
 - Einfache Variante mit Differentialantrieb entsprechend handelsüblicher FTS-Plattformen, Traglast bis zu 100 kg, ggf. mehr
 - Batterie, Motoren möglichst platzsparend verbaut
 - Eigengewicht und Abmessungen geeignet für Einsatz in Altenheimen, damit Anlehnung an Vorgaben für rollstuhlgerechte Umgebungen

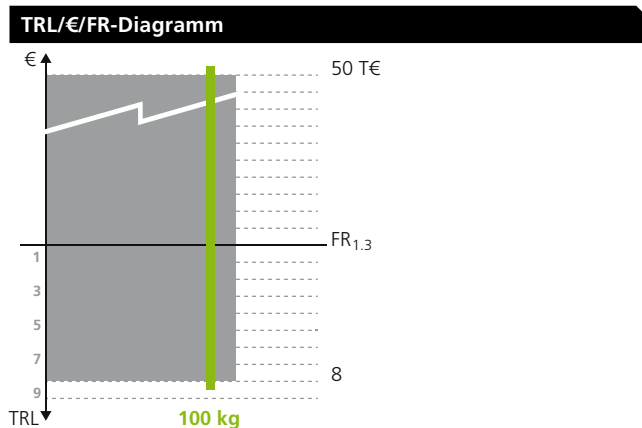


Abb. 3-2.6 TRL/€/FR-Diagramm für die mobile Plattform, Parameter: Traglast

- Navigationssensorik

- Laser 2-D (Laserentfernungsmesser zur sicherheitstechnischen Überwachung, z.B. Sick S300 oder Navigation z.B. Sick NAV)
- Reflektorbasierte Lasersysteme zur Positionsbestimmung derzeit teuer ~7 000 Euro
- Kosten für Installation (Anbringen und Einmessen der Marker)
- Kosten für Sicherheitsscanner ~3 000 Euro
- Forschungsarbeiten: Nutzen von Sicherheitssensoren im Kontext mit natürlichen Markern, damit Modifikation der Umgebung und zusätzliche Navigationssensoren eingespart
- 3-D CCD-Kamera mit geringer Auflösung, z.B. Typ O2DIRPKG/K von ifm
 - Aktives Messsystem (moduliertes Infrarotlicht)
 - geeignet für Volumen-Kollisionsschutz (in Fahrbereich hineinragende Hindernisse)
 - Kosten pro Einheit ~400 Euro
 - Öffnungswinkel 40°x30° dadurch sind mehrere Systeme notwendig (2 – 3)
 - Problem: Derzeit keine Sicherheitszertifizierung; begrenzte Auflösung; Probleme bei schnellen Bewegungen
 - Günstige Alternative: Ultraschall, aber zu störungsanfällig für autonomes System mit hoher Verfügbarkeit.

- Erkennungssensorik

- 3-D CCD-Kamera mit hoher Auflösung, z.B. SwissRanger von mesa oder CamCube von pmd
 - Aktives Messsystem (moduliertes Infrarotlicht)
 - Bedingt geeignet für Objekterkennung und -lokalisierung im genannten Messbereich
 - Problem: „hohe Auflösung“ ist relativ, steht hinter der von handelsüblichen 2-D-Kameras immer noch zurück, dadurch Ungenauigkeiten in der Erkennung
 - Kosten pro Einheit ~6 000 Euro



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

- 2-D-Farbkameras, z.B. AVT Pike
 - Hochpräzise, zum Ausgleich der Ungenauigkeiten der 3-D-Sensoren
 - Kopplung mit 3-D-Sensorik ermöglicht Objekterkennung und -lokalisierung im genannten Messbereich
 - Kosten pro Einheit ~3 000 Euro
- 4-DOF-Leichtbauroboterarm an Linearachse, z.B. Schunk LWA-Module in Kombination mit einer Schlüter Linearachse
 - Modulares System mit geeigneten Verlängerungen / integrierter Linearachse, um den gesamten Arbeitsraum erreichen zu können
 - Kosten pro Einheit ~5 000 Euro
- Adaptiver 2-Finger-Greifer mit integriertem Visionsystem
 - Für Objekte unterschiedlicher Größe (10 – 50 cm) und Geometrie geeignet
 - Erfolgreiches Greifen muss verifiziert werden können

TRL/€/FR-Diagramm

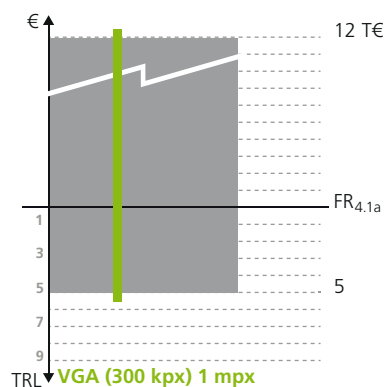


Abb. 3-2.7 TRL/€/FR-Diagramm für die Erkennungssensorik. Kopplung von 3-D-Sensorik und Stereokamera-System. Parameter: Auflösung

TRL/€/FR-Diagramm

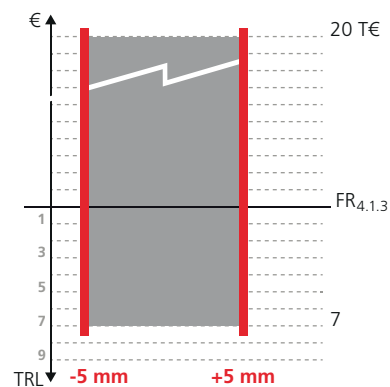


Abb. 3-2.8 TRL/€/FR-Diagramm für den 4-DOF Leichtbauarm, Parameter: Positioniergenauigkeit

TRL/€/FR-Diagramm

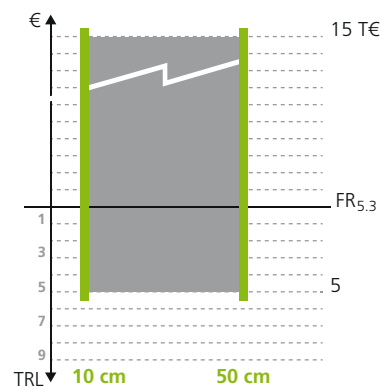


Abb. 3-2.9 TRL/€/FR-Diagramm für den adaptiven 2-Finger-Greifer, Parameter: Größe der zu greifenden Objekte

Systemkritische Komponenten ohne (Serien-)Produktstatus (Spezialanfertigungen, keine vereinheitlichten Produktionsprozesse, Skaleneffekte zu erwarten)

- Einlagerungs- und Bereitstellungsmechanismus
 - Für Pflegeutensilien unterschiedlicher Größe
 - Möglichst effiziente Lagerung
 - Interaktion mit dem Bediener über Bereitstellungsclappe



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

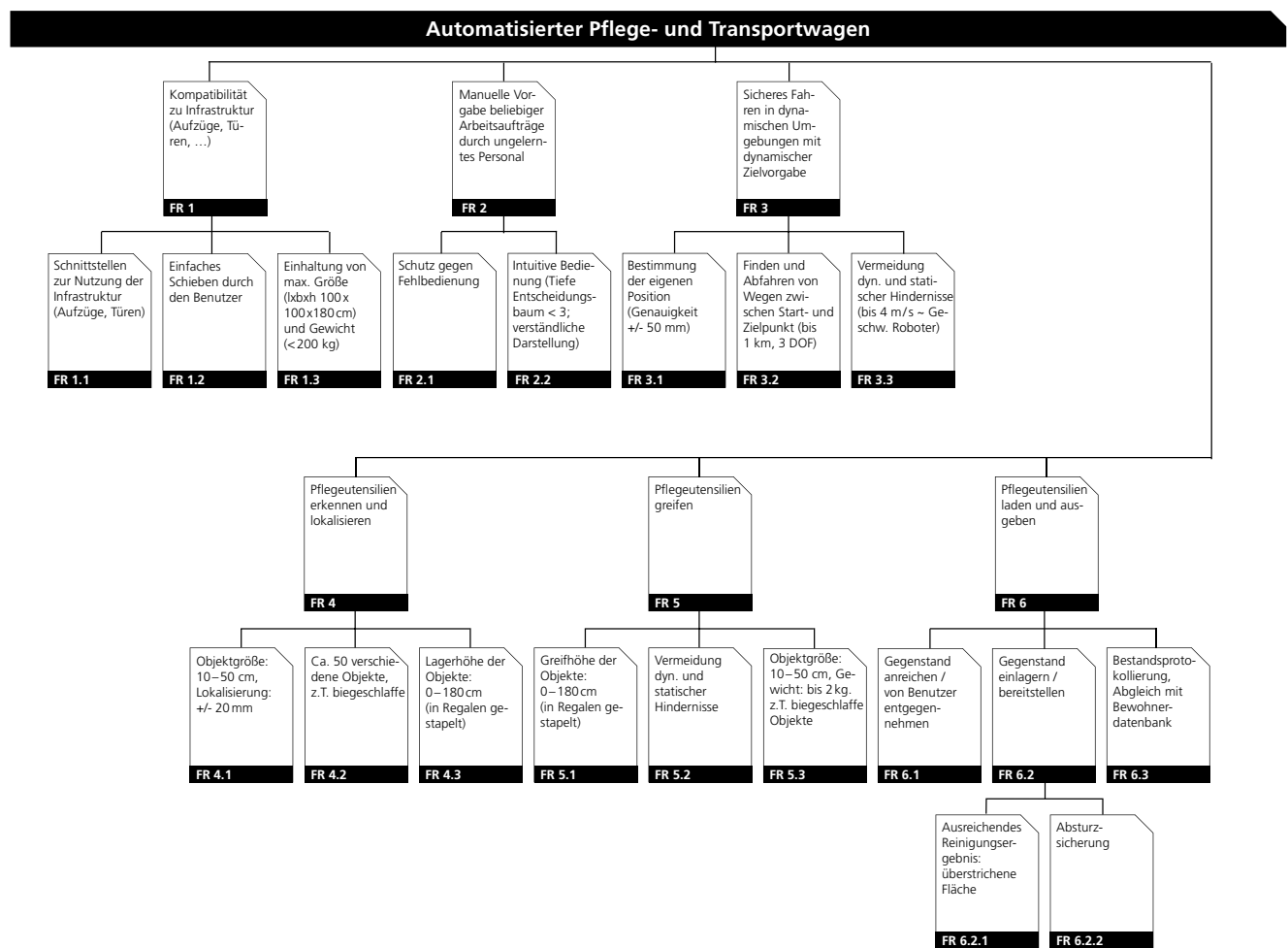


Abb. 3-2.10 Axiomatic Design – Functional Requirements



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

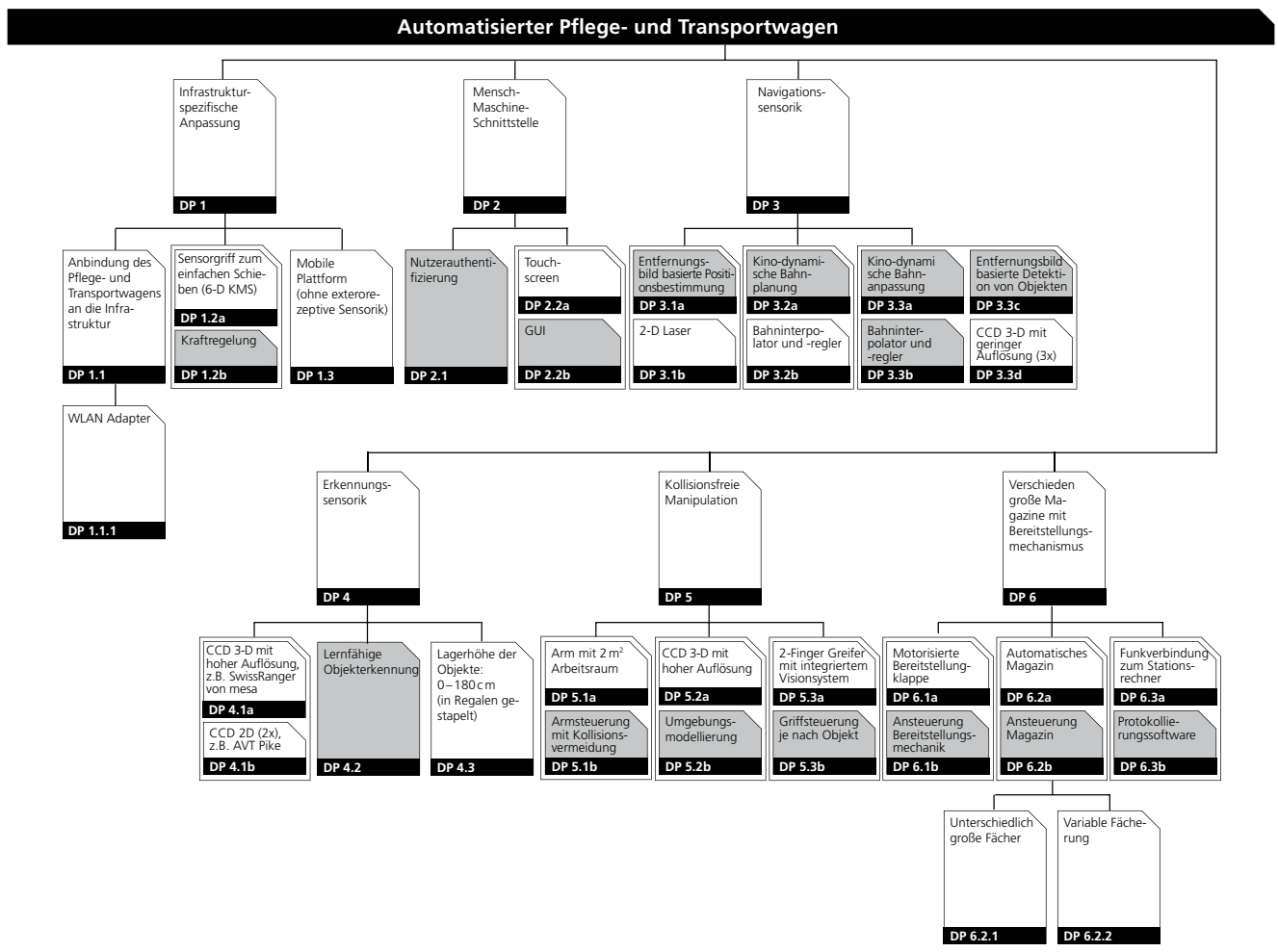


Abb. 3-2.11 Axiomatic Design – Design Parameters



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.2 Software

Folgende Softwarefunktionen werden benötigt:

- Grafische Benutzeroberfläche
 - Einfache Benutzerführung mit Vermeidung von unbefugtem Bedienen
 - Komponenten verfügbar, geringer Anpassungsaufwand
- Kollisionsfreie Navigation im Raum
 - Bahnplanung zu vorgegebenem Ziel
 - Vermeidung unterschiedlichster Hindernisse, „roboterfeindliche“ Umgebung
 - Zuverlässiges Erkennen der Hindernisse (verschiedene Höhen, Größen, Materialien, etc.) durch Sensoren
 - Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig
- Kraftregelung
 - Einfaches „Schieben“ des Transportwagens durch die Pflegekräfte mit Motorunterstützung
 - Kräfte am Sensorgriff einlesen und Geschwindigkeit ableiten
- Ansteuerung des Bereitstellungsmechanismus
 - Ansteuerung des Motors zum Drehen des Magazins
 - Ansteuerung des Motors für den Bereitstellungsmechanismus
 - Verwaltung / Registrierung (was liegt wo?)
 - Vgl. Ansteuerung 2-DOF-Arm
 - Eigenentwicklung notwendig, technische Komplexität gering
- Protokollierungssoftware / Abgleich zwischen vorhandenen und benötigten Utensilien
 - Registrierung der eingelagerten Utensilien
 - Abrufen der benötigten Gegenstände aus der Patientendatenbank
 - Komponenten (Datenbankanbindung) verfügbar, geringer Anpassungsaufwand
- Objekterkennung
 - Erkennung von Objekten unterschiedlicher Größe und Beschaffenheit
 - Unstrukturierter Hintergrund
- Unterschiedliche Sichtwinkel
- Wechselnde Beleuchtungsverhältnisse
- Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig
- Objektlokalisierung
 - Positionsbestimmung erkannter Objekte auf ± 20 mm
 - Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig
- Objektlernen („Teachen“)
 - Einfaches Einlernen neuer Objekte
 - Modelle ausreichend präzise für Lokalisierung
 - Eigenentwicklung notwendig, technische Komplexität hoch
- Umgebungsmodellierung
 - 3-D-Modell als Basis für den Kollisionsschutz beim Greifen
 - Update in Echtzeit
 - Eigenentwicklung notwendig, technische Komplexität hoch
- Roboterarmsteuerung mit Hindernisumfahrung / Griffsteuerung
 - Trajektorienplanung und Bewegungsführung zum Greifen der Pflegeutensilien
 - Auswahl eines geeigneten Griffs bzw. Greifpunkts
 - Eigen- und Fremdkollisionsvermeidung
 - Eigenentwicklung notwendig, technische Komplexität hoch
- Ablaufsteuerung
 - Steuerung des gesamten Ablaufs (Erkennen, Lokalisieren, Greifen, Ablegen)
 - Synchronisierung von Linearachse und Roboter
 - Grundkomponenten verfügbar, ablauf- und komponentenspezifische Anpassungen benötigt



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.3 Variante

Einschränkungen für den Markterfolg des Serviceroboter-Systems resultieren insbesondere aus der geringen Nutzung und durch die hohen Kosten des in Abb. 3-2.10 und Abb. 3-2.11 vorgeschlagenen Roboterarms sowie der mobilen Plattform.

Die vorgeschlagene Variante (SR-Variante B) kommt ohne Roboterarm aus und ist somit nicht in der Lage, sich selbst zu bestücken. Die Bestückung erfolgt im automatisierten Lager mit Hilfe eines handelsüblichen Portalroboters. Damit treten zusätzliche Kosten für die Automatisierung des Lagers auf, die Kosten für jeden einzelnen Serviceroboter können jedoch entsprechend reduziert werden. Des Weiteren kommt eine kostengünstige mobile Roboterplattform zum Einsatz, die nicht auf handelsüblichen FTS-Plattformen basiert, sondern in dem angenommenen Fall low-cost Eigenbaus (vom Fraunhofer IPA) entwickelt wurde.

TRL/€/FR-Diagramm

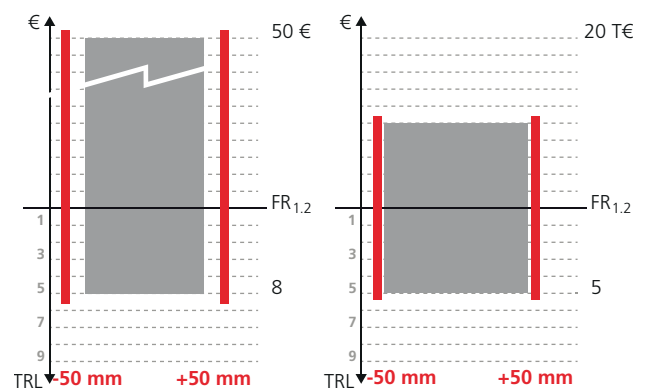


Abb. 3-2.12 TRL/€/FR-Diagramm für die mobile Plattform in den Varianten: FTS-Plattform (links) und low-cost Eigenbau vom Fraunhofer IPA (rechts), Parameter: Positioniergenauigkeit

Die durch den Einlagerungsmechanismus und der damit verknüpften Registrierung der eingelagerten Pflegeutensilien entstehenden Vorteile bleiben erhalten. Die Vollständigkeit des Wagens ist weiterhin sichergestellt und Laufwege der Pflegekräfte aufgrund von fehlenden Gegenständen werden vermieden. Auch die Hygiene bei der Entnahme der Gegenstände aus dem Pflegewagen wird weiterhin gewährleistet.



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

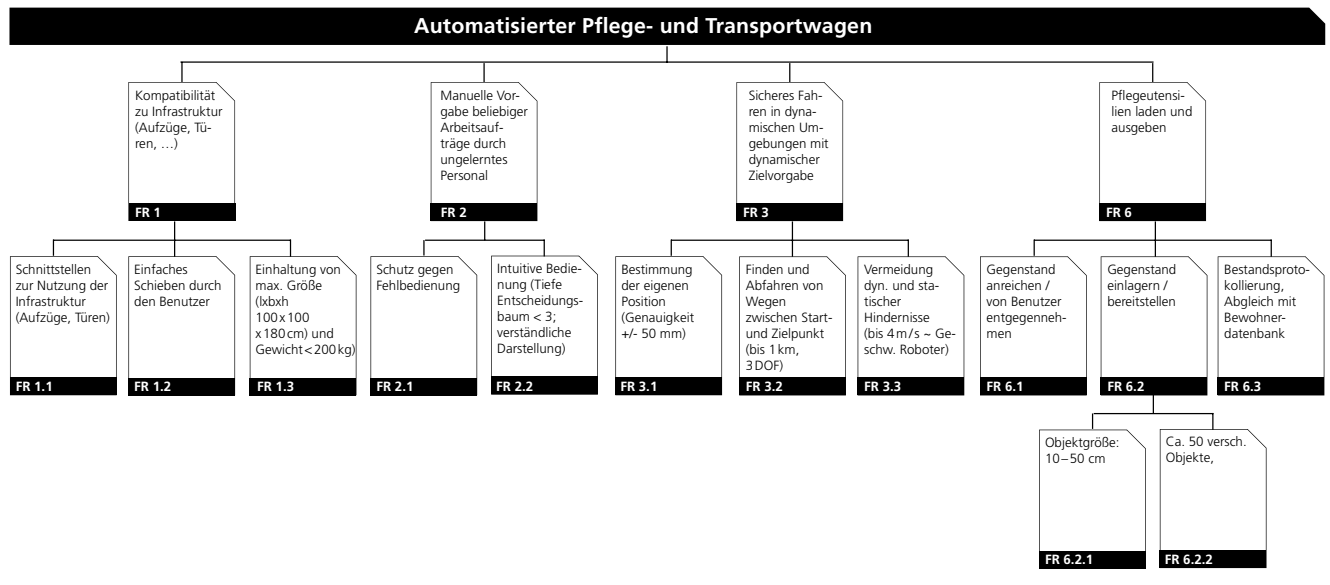


Abb. 3-2.13 Axiomatic Design – Functional Requirements für SR-Variante B.

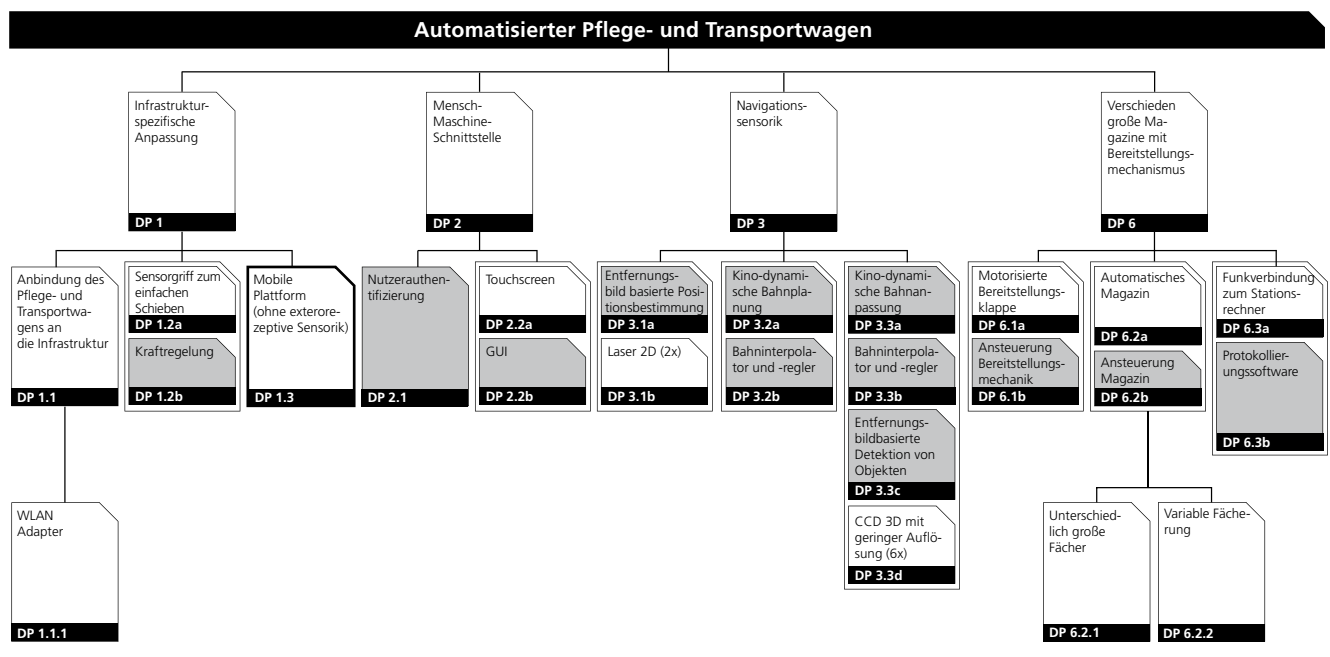


Abb. 3-2.14 Axiomatic Design – Design Parameters für SR-Variante B.



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.1	Kommunikation mit Aufzügen, Türen zur Nutzung der Infrastruktur	DP 1.1 Anbindung des Pflege- und Transportwagens an die Infrastruktur	WLAN ist Teil der Plattform	8	1	Eingriff in die Aufzugsteuerung nicht von allen Herstellern akzeptiert, ggf. Garantieverlust
FR 1.2 Einfaches Schieben durch den Benutzer	Geringer Kraftaufwand, kurze Reaktionszeiten	DP 1.2a Sensorgriff zum einfachen Schieben (6-D KMS)	6 000 €	9	2	
		DP 1.2b Kraftregelung		8	2	
FR 1.3 Einhaltung von max. Größe und Gewicht	max. Größe: lxbxh 100x100x180 cm, Gewicht < 200 kg	DP 1.3 Mobile Plattform (ohne exterorezeptive Sensorik)	50 000 €	8	2	
FR 2.1 Schutz gegen Fehlbedienung		DP 2.1 Nutzerauthentifizierung		9	1	
FR 2.2 Intuitive Bedienung	Tiefe Entscheidungsbaum < 3; verständliche Darstellung	DP 2.2a Touchscreen	Touchscreen ist Teil der Plattform	9	2	
		DP 2.2b GUI		9	2	
FR 3.1	Genauigkeit +/- 5 cm	DP 3.1a Entfernungsbildbasierte Positionsbestimmung		8	2	
		DP 3.1b Laser 2D	3 000 €	9	2	
FR 3.2 Finden und Abfahren von Wegen zwischen Start- und Zielpunkt	bis 1 km, 3 DOF	DP 3.2a Globale Bahnplanung unter kino-dynamischen Randbedingungen		8	2	
		DP 3.2b Bahninterpolator und -regler		8	2	
FR 3.3	bis 4 m/s ~ Geschw. Roboter	DP 3.3a Lokale Bahnanpassung unter kino-dynamischen Randbedingungen		6	1	Zeitnahe Reaktion / Bahnanpassung auf dynamische Hindernisse bei gleichzeitiger Beibehaltung der Bewegungsstabilität
		DP 3.3b Bahninterpolator und -Regler		8	2	
		DP 3.3c Entfernungsbildbasierte Detektion & Verfolgung von Objekten		6	1	Zuverlässige Erkennung von Objekten (Hindernissen) unterschiedlicher Form und Größe mit einfacher Sensorik
		DP 3.3d CCD 3D mit geringer Auflösung (6x)	1 200 €	8	2	



01



02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse	
FR 4 Pflegeutensilien erkennen und lokalisieren	FR 4.1 Objektgröße: 10-50 cm, Lokalisierung: +/- 20 mm	DP 4.1a CCD 3D mit hoher Auflösung, z.B. SwissRanger von mesa	6 000 €	7	2	Nicht ausreichende Auflösung der Sensordaten (max. 200x200 px, Genauigkeit +/- 1 cm)	
		DP 4.1b CCD 2D (2x), z.B. AVT Pike	6 000 €	9	2	Anpassung an variable Beleuchtungsverhältnisse	
	FR 4.2 Ca. 50 versch. Objekte, häufig wechselnde Hersteller, teilweise biegeschlaffe Teile (z.B. Bettwäsche, Tücher).	DP 4.2 Lernfähige Objekterkennung			4	2	Wechselnde Lichtverhältnisse und Hintergründe, teilweise Verdeckung der Objekte, Erkennung /Klassifikation von Objekten auf Basis unterschiedlichster Merkmale, einfaches und intuitives Einlernen neuer Objekte (Form / Griffe), Erkennung biegeschlaffer Teile
	FR 4.3 Höhe der Objekte: 0 – 180 cm (in Regalen gestapelt)	DP 4.3 Anbringung der Sensoren am Roboterarm			9	1	
FR 5 Pflegeutensilien greifen	FR 5.1 Höhe der Objekte: 0 – 180 cm (in Regalen gestapelt)	DP 5.1a Arm mit 2m ³ Arbeitsraum, z.B. 4 Schunk-Module auf Linearachse	25 000 €	7	2	Zuverlässigkeit / Robustheit	
		DP 5.1b Armsteuerung mit Kollisionsvermeidung			4	1	Strategie für das Greifen verdeckter Objekte / wenn andere Objekte den Weg verstellen, Hindernisse beim Greifen können verdeckt sein, Unterscheidung manipulierbares Objekt <=> Hindernis, existierende Pfadplanungsalgorithmen oft zu langsam für schnelles Umplanen in dynamischen Umgebungen, Durchführung zwangsgeführter Bewegungen
	FR 5.2 Vermeidung dynamischer und statischer Hindernisse	DP 5.2a CCD 3D mit hoher Auflösung, z.B. SwissRanger von mesa	s. DP 4.1a	7	1	s. DP 4.1a	
		DP 5.2b Umgebungsmo- dellierung			4	1	Segmentierung einzelner Objekte unter Verwendung ungenauer Sensordaten, online-Update des Umgebungsmodells, nur teilweise Sicht auf die Umgebung, Rechnerperformance: Genauigkeit vs. Geschwindigkeit

>>



01



02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
	FR 5.3 Objektgröße: 10-50 cm, Gewicht: bis 2 kg. Ca. 50 versch. Objekte, häufig wechselnde Hersteller, teilweise biegeschlaffe Teile (z.B. Bettwäsche, Tücher).	DP 5.3a 2-Finger Greifer mit integriertem Visionsystem	15 000 €	5	2	Greifen von Objekten unterschiedlicher Größe, Form und Materialbeschaffenheit
		DP 5.3b Griffsteuerung entsprechend zu greifendem Objekt		4	2	Greifpunktbestimmung bei unvollständigen Sensordaten z.B. bei Verdeckung des zu greifenden Objekts, Manipulation unbekannter Objekte, Überwachung des Greifvorgangs (korrekt gegriffen?), online Lernen von Griffen
FR 6.1 Gegenstand anreichen / von Benutzer entgegennehmen		DP 6.1a Motorisierte Bereitstellungsklappe	5 000 €	7	2	Intuitives Anreichen bzw. Entgegennehmen und Verstauen der Objekte insbes. unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Form und Größe
		DP 6.1b Ansteuerung Klappe und Bereitstellungsmechanik		8	2	
FR 6.2 Gegenstand einlagern / bereitstellen	FR 6.2.1 Objektgröße: 10-50 cm	DP 6.2.1 Unterschiedlich große Fächer		9	2	
	FR 6.2.2 50 versch. Objekte	DP 6.2.2 Variable Fächerung		9	2	
FR 6.3 Bestandsprotokollierung, Abgleich mit Bewohnerdatenbank		DP 6.3b Protokollierungssoftware / Abgleich vorhandene mit benötigten Utensilien		9	2	
		DP 6.3a Funkverbindung zum Stationsrechner	WLAN ist Teil der Plattform	9	2	

SR-Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.3 Einhaltung von max. Größe und Gewicht	max. Größe: lxbxh 100x100x180 cm, Gewicht <200 kg	DP 1.3 Mobile Plattform (Variante)	20 000 €	5	2	Kompakte Bauform, hohe Traglast bei gleichzeitiger Kostenminimierung

Tab. 3-2.1 Komponentenübersicht



01



02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Manuelle Alternative (entfällt)		
Grunddaten Use Case							
• Lebensdauer (a)		12		12		12	
• Anzahl Roboter (System)		1		1		-	
• Eff. Produktivzeit (h/a)		6 570		6 570		-	
• Personalstunden (h/a)		17 520		17 520		17 520	
• Entlastung (h/a) ¹ (Nebentätigkeit)		821,3		821,3		0	
LCC-Summe (T€)		3 466,3	100%	3 356,9	100%	3 153,6	100%
• Investition		152,4	4,4%	73,9	2,2%	0,0	0,0%
• Installationskosten		16,0	0,5%	32,0	1,0%	0,0	0,0%
• Aktivitätskosten		3 158,6	91,1%	3 158,6	94,1%	3 153,6	100,0%
• Wartung/Instandhaltung		139,4	4,0%	92,4	2,8%	0,0	0,0%
• Andere		-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)		-2 041,0		-1 951,8		-1 790,6	
Softwarekosten (T€)		6 886,0		4 450,0 (SR) 5 746,0 (Lager)		-	
Leistungskosten (€/h)		32,98		31,93		30,00	

Tab. 3-2.2 LCC

Erläuterung zu Tab. 3-2.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tab. 3-2.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Serviceroboter-Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Systems ausgegangen (365 Tage). Es wird nur eine Station betrachtet (20 zu betreuende Personen pro Station). Das System wird in einem Dreischicht-Modell bei 8 h Schichtdauer eingesetzt – zum Betrieb sind je Schicht durchschnittlich zwei Personen notwendig. Das Personal verbringt dabei ca. 1 Stunde mit Nebentätigkeiten wie Dokumentation und Bestückung der Pflegewagen. Die Verfügbarkeit des Systems wird mit 75% angesetzt (technischer Ausfall; kein „Ersatz-Roboter“ im Szenario), so dass die effektive Produktivzeit 6 570 h/a beträgt. Der Robotereinsatz entlastet das Personal bei den Nebentätigkeiten um 50%, so dass sich die Entlastung auf 821,3 h/a

summiert (diese Entlastung ist nicht produktivitätswirksam).

SR-Variante B: Keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Kein Serviceroboter-Einsatz, ansonsten keine Änderung.

Investition: Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (117,2 Tsd Euro pro Serviceroboter) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

SR-Variante B: Aufgrund der technischen geänderten Konfiguration ist die Summe der Komponentenkosten geringer als in der SR-Variante A (29,2 Tsd Euro pro Roboter), dafür fallen aber zusätzliche Kosten für die notwendige Systeminfrastruktur an (Lager für 3 Stationen: 83 Tsd Euro, da hier nur eine Station betrachtet wird, wird hier nur ein Drittel dieser Kosten angesetzt) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators. Ansonsten keine Änderungen.

Manuelle Alternative: keine Kosten.

Installationskosten: Sowohl für die Planung und (Erst-)



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Einrichtung des Systems bzw. Schulung wird jeweils ein externer Personalaufwand von 15 PT (120 Ph) bzw. 5 PT (40 Ph) angesetzt (100 Euro/Ph). Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen.

SR-Variante B: Bei der Inbetriebnahme des Systems fallen zusätzliche 20 PT (160 Ph) für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Systems an. Diese Aufgabe wird ebenfalls durch den Systemintegrator übernommen.

Manuelle Alternative: Keine Änderung.

Aktivitätskosten: Die Personalkosten für das Pflegepersonal werden mit 15 Euro/h angesetzt (10 Euro/h Mindestlohn + 50% Personalnebenkosten). Der Energieverbrauch beträgt 0,5 kW/h pro Roboter (3 285 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt.

SR-Variante B: Der Energieverbrauch beträgt 0,4 kW pro Roboter (2 628,0 kWh/a) und 0,05 kW für die notwendige Infrastruktur (328,5 kWh/a) während der Produktivzeit – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt.

Ansonsten keine Änderung.

Manuelle Alternative: Keine Änderung.

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von 100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

SR-Variante B: Keine Änderung.

Manuelle Alternative: Entfällt.

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik ([s. Kap. 2.3.1.2](#)) 6 886 Tsd Euro für SR-Variante A bzw. 4 450 Tsd Euro für die SR-Variante B sowie 5 746 Tsd Euro für die benötigte Lagersoftware bei SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

Beim Serviceroboter-Anwendungsfall handelt es sich nicht um eine 100%ige Automatisierungslösung im Vergleich zur manuellen Variante, sondern im Wesentlichen um eine Unterstützungsaufgabe bezogen auf eine nicht produktivitätswirksame

Nebentätigkeit des Personals. Es wird davon ausgegangen, dass das System vollausgelastet ist. Als Leistungsgröße wird hier die maximale verfügbare Betreuungszeit (= Arbeitszeit der Pflegekraft abgeleitet aus dem Schichtmodell) herangezogen (hier 8 760 h/a).

Kostenstruktur: Auch in den Serviceroboter-Szenarien stellen die Aktivitätskosten mit mehr 90% Anteil an den Lebenszykluskosten den größten Kostenblock dar, was ausschließlich auf die Lohnkosten der Arbeitskräfte zurückzuführen ist.

Wirtschaftlichkeit: Aus wirtschaftlicher Sicht können die SR-Varianten grundsätzlich nicht günstiger als die manuelle Alternative sein, da sich im hier betrachteten Anwendungsszenario die Leistungsgröße alleine aus der Personalverfügbarkeit ergibt – diese ändert sich durch den Serviceroboter-Einsatz nicht (reine Entlastungsaufgabe bei Nebentätigkeiten, die zu keiner angenommenen Produktivitätserhöhung führt). Die Leistungskosten der SR-Varianten liegen demnach 32,98 bzw. 31,93 Euro/h gegenüber 30,00 Euro/h in der manuellen Alternative. Auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF sind die SR-Varianten deutlich ungünstiger (-2 041,0 bzw. 1 951,8 vs. -1.790,6 Tsd Euro).⁹

Sensitivität: Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem hier betrachteten Anwendungsszenario um eine reine Entlastungsaufgabe in einer Nebentätigkeit handelt, ist eine Sensitivitätsanalyse an dieser Stelle nicht zweckmäßig.

3.2 Nutzwert

- Das Pflegepersonal kann sich stärker auf die Versorgung der Bewohner konzentrieren, daraus resultiert nicht nur eine Steigerung der Pflegequalität und damit der Lebensqualität der Bewohner, vielmehr wird auch die hohe Belastung der Pflegekräfte reduziert und somit deren Arbeit attraktiver gestaltet.
- Lückenlose Dokumentation und Hygiene bei der Patienteninteraktion sind automatisch sichergestellt.

⁹ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).





BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter- Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter- Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Gesundheit“

Die Gesundheitsausgaben sind seit 1995 kontinuierlich gestiegen und betragen im Jahr 2006 245,0 Mrd Euro (vgl. Tab. 3-2.3).¹⁰ Hauptkostentreiber dieser Entwicklung sind neben dem aufgrund der demografischen Entwicklung gestiegenem Leistungsvolumen insbesondere auch Qualitätsverbesserungen sowie die Preisentwicklung der Gesundheitsdienstleistungen. Die überproportionalen Ausgabenzuwächse werden dabei nur teilweise auf den technologischen Fortschritt zurückgeführt – in einigen Leistungsbereichen wie der Arzneimittelversorgung werden als Gründe dafür auch ausdrücklich fehlende Wirtschaftlichkeitsanreize verantwortlich gemacht. Als weiteres prägendes Element der Gesundheitsausgaben wird die intensive Gesetzgebung angeführt – gerade in Hinsicht auf die gesetzliche Kranken- und Pflegeversicherung.

Etwa die Hälfte der Gesamtkosten entfallen auf ärztliche und pflegerisch/therapeutische Leistungen (66,4 bzw. 58,8 Mrd Euro) – der Anteil der Investitionen an den Gesamtausgaben beträgt ca. 3,7% (9,0 Mrd Euro). Aus Sicht der Einrichtungen entfallen die meisten Ausgaben auf den

Krankenhausbereich (63,9 Mrd Euro) – der Bereich Pflege folgt mit 18,8 Mrd Euro erst an vierter Stelle.

Mit 139,8 Mrd Euro wird der Großteil der Kosten durch die gesetzliche Krankenversicherung getragen, gefolgt von privaten Haushalten/Organisationen (33,3 Mrd Euro), den privaten Krankenversicherungen (22,5 Mrd Euro) und der sozialen Pflegeversicherung (18,1 Mrd Euro) – der Rest verteilt sich auf die öffentlichen Haushalte, Arbeitgeber sowie die gesetzlichen Unfall- und Rentenversicherungsträger. Mit etwa 4,2 Millionen Beschäftigten findet sich etwa jeder 9te Arbeitsplatz in Deutschland im Gesundheitswesen (zum Vergleich: Automobilbau nur etwa jeder 50te). In vielen Bereichen wird über einen Arbeitskräftemangel geklagt, der sich in Zukunft noch verstärken wird.

Leistungsarten	1995	2000	2005	2006
Prävention / Leistungsschutz	7,5	7,5	8,9	9,3
Ärztliche Leistungen	51,7	57,5	61,1	66,1
Pflegerische / therapeutische Leistungen	43,7	52,3	57,5	58,8
Unterkunft / Verpflegung	16,0	16,5	17,7	18,5
Waren, davon:				
• Arzneimittel	26,4	31,6	39,4	39,6
• Hilfsmittel	8,8	10,4		
• Zahnersatz (nur Material und Laborkosten)	5,5	5,4		
• sonstiger medizinischer Bedarf	7,9	8,9		
Transporte	2,8	3,4	4,0	4,0
Verwaltungsleistungen	9,9	11,3	13,1	13,1
Investitionen	7,2	8,3	9,2	9,0
Gesamt	186,5	212,4	239,3	245,0

Tab. 3-2.3 Kostenstruktur der Gesundheitsausgaben nach Leistungsarten in Mrd Euro.

¹⁰ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden aus Robert-Koch-Institut (2006): Gesundheitsberichtserstattung des Bundes. Gesundheit in Deutschland. Zusammenfassung. (www.qbe-bund.de)



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 4 MARKTDATEN

Einrichtungen	1995	2000	2005	2006
Gesundheitsschutz	1,8	1,8	1,9	1,9
Ambulante Einrichtungen	87,0	100,8	115,3	118,6
davon:				
• Arztpraxen	27,0	30,8	35,1	36,4
• Zahnarztpraxen	14,0	14,7	15,2	15,8
• Praxen sonstiger medizinischer Berufe	4,8	5,8	7,0	7,1
• Apotheken	23,6	28,2	34,7	34,7
• Gesundheitshandwerk / -einzelhandel	12,6	14,1	14,7	15,5
• ambulante Pflege	3,9	5,8	7,1	7,4
• sonstige Einrichtungen	1,1	1,3	1,6	1,6
Stationäre / teilstationäre Einrichtungen	70,9	78,8	87,5	90,1
davon:				
• Krankenhäuser	51,1	56,4	62,1	63,9
• Vorsorge- / Rehabilitations- einrichtungen	7,6	7,5	7,3	7,4
• stationäre / teilstationäre Pflege	12,2	14,9	18,1	18,8
• Rettungsdienste	1,7	2,1	2,6	2,6
• Verwaltung	11,0	12,7	14,5	14,5
• sonstige Einrichtungen und private Haushalte	6,3	7,4	7,3	7,3
Ausland	0,6	0,6	0,9	1,0
Investitionen	7,2	8,3	9,2	9,0
Gesamt	186,5	212,4	239,3	245,0

Tab. 3-2.4 Kostenstruktur der Gesundheitsausgaben nach Einrichtungen
in Mrd Euro.

Lage:

Wie Modellrechnungen des Statistischen Bundesamtes (Destatis)¹¹ zeigen, kann der absehbare demografische Wandel in Deutschland zu etwa 58% mehr Pflegebedürftigen und 12% mehr Krankenhausbehandlungen im Jahr 2030 im Vergleich zu heute führen. Die Zahl der Pflegebedürftigen dürfte von 2,1 Millionen auf 3,4 Millionen und die in Krankenhäusern behandelten Fälle von 17 auf 19 Millionen steigen.

Ursache für diese Zunahmen ist die steigende Zahl an Älteren bei insgesamt sinkender Gesamtbevölkerung. Nach den Ergebnissen der aktuellen Bevölkerungsvorausberechnung wird die Zahl der 60-Jährigen und Älteren bis 2030 um rund 38% von 20,5 Millionen auf voraussichtlich 28,4 Millionen Einwohner und die der über 80-Jährigen vermutlich sogar um 73% von 3,6 Millionen auf 6,3 Millionen ansteigen.

Die veränderte Bevölkerungsstruktur dürfte zukünftig zu einem deutlich höheren Anteil älterer Pflegebedürftiger führen: Während heute 53% der Pflegebedürftigen 80 Jahre und älter sind, könnten es im Jahr 2030 rund 65% sein. Die Zahl der Pflegebedürftigen in diesem Alter nimmt dabei von 1,1 Millionen auf etwa 2,2 Millionen im Jahr 2030 zu. In der hier zugrundeliegenden Basisvariante der Modellrechnung ist unterstellt, dass die altersspezifischen Pflegequoten im Jahr 2030 identisch mit denen von heute sind. Geht man hingegen davon aus, dass sich das Pflegerisiko entsprechend der steigenden Lebenserwartung in ein höheres Alter verschiebt, läge die Zahl der ab 80-jährigen Pflegebedürftigen bei 2,0 Millionen. Die Gesamtzahl der Pflegebedürftigen würde in diesem Modell etwas weniger stark auf 3,0 Millionen im Jahr 2030 ansteigen (Basisvariante: 3,4 Millionen).

¹¹ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden Statistisches Bundesamt (2007): Pflegestatistik 2007. (www.destatis.de)



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 4 MARKTDATEN

Investitionsverhalten:

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen zum Investitionsverhalten im Gesundheitsbereich festhalten:

- Aufgrund der demografischen Entwicklung wird mit einem weiteren Anstieg des Leistungsvolumens zu rechnen sein, der tendenziell schneller anwachsen wird als die Mittel zu seiner Finanzierung.
- Entscheidendes Element bei der Bewertung von Investitionsvorhaben wird vor allem ihre Wirtschaftlichkeit sein. Aufgrund des engen finanzwirtschaftlichen Rahmens werden auch die Finanzierungsmöglichkeiten eine wesentliche Rolle spielen – hier wird davon ausgegangen, dass sich diese bei privaten Trägern besser darstellt als bei gesetzlichen.
- Qualitative Faktoren spielen zwar eine Rolle, werden jedoch erst relevant, wenn die absolute Wirtschaftlichkeit der Investition sichergestellt ist. Eine Ausnahme könnten Investitionsprojekte darstellen, die dazu beitragen dem Arbeitskräftemangel zu begegnen – entweder dadurch, dass sie bei vorhandenen Tätigkeiten entlasten oder diese komplett übernehmen.

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Stationäre Pflege“

Tab. 3-2.5 ergänzt die obigen Marktstrukturdaten spezifisch mit Daten aus dem Bereich „Stationäre Pflege“.

Bundesweit gab es im Dezember 2007 rund 11 000 nach SGB XI zugelassene voll- bzw. teilstationäre Pflegeheime. Die Mehrzahl der Heime (55% bzw. 6 100) befand sich in freigemeinnütziger Trägerschaft (z.B. DIAKONIE oder CARITAS); der Anteil der privaten betrug 39% – er liegt somit niedriger als im ambulanten Bereich. Öffentliche Träger haben, wie im ambulanten Bereich, den geringsten Anteil (6%).

Bei jedem fünften Heim (20%) war neben dem Pflegebereich auch ein Altenheim oder Betreutes Wohnen organisatorisch angeschlossen. Dort werden hauptsächlich ältere Menschen betreut, die keine Leistungen aus der Pflegeversicherung erhal-

ten. Im Schnitt betreute ein Pflegeheim 64 Pflegebedürftige. Auch hier im stationären Bereich betreiben die privaten Träger eher kleine Einrichtungen: Im Mittel wurden in den privaten Heimen 54 Pflegebedürftige betreut; hingegen bei den freigemeinnützigen 71 Pflegebedürftige und den öffentlichen Heimen 77.

Betriebe (Anzahl) und Plätze (Anzahl)	11 029 / 799 059
davon Private Träger	4 322 / 275 257
davon Freigemeinnützige Träger	6 072 / 469 574
davon Öffentliche Träger	635 / 469 574
davon 1 – 60 Plätze	5 880
davon 61 – 200 Plätze	5 023
davon 201 und mehr Plätze	126
Pflegebedürftige	709 311
Pflegestufe I	253 406
Pflegestufe II	299 936
Pflegestufe III	145 136
ohne Zuordnung	10 833
Beschäftigte	573 545
davon Vollzeit	202 764
davon Teilzeit (inkl. geringfügig Beschäftigte)	327 992
davon Zivildienstleistende/Azubis/etc.	42 789

Tab. 3-2.5 Strukturdaten „Stationäre Pflege“ 2007

In den Heimen waren insgesamt 574 000 Personen beschäftigt. (Dies entspricht bei einer Gewichtung nach der jeweiligen Arbeitszeit ungefähr 421 000 Vollzeitäquivalenten). Die Mehrzahl (85%) der beschäftigten Personen war weiblich. Die meisten Beschäftigten hatten ihren Arbeitsschwerpunkt im Bereich Pflege und Betreuung: 69% der Beschäftigten wurden hier eingesetzt.



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 4 MARKTDATEN

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Serviceroboter-Anwendungsfall im Bereich Pflege bezieht sich ausschließlich auf den Einsatz in Pflegeheimen (stationäre Pflege). Aus diesem Grund wird auf Basis der Daten der Gesundheitsberichtserstattung des Bundes der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-2.6):¹²

- Statistisch relevanter Sektor ist die „Pflege im Rahmen der Pflegeversicherung“, Bereich „Pflegeheime“
- Es wird angenommen, dass nur Pflegeheime ab einer bestimmten Größe in der Lage sind, die entsprechenden Investitionen zu tätigen. Als Grenze werden hier Pflegeheime mit 200 und mehr Plätzen gesehen.¹³

Pflegeheime insgesamt	11 029
davon mit mehr als 200 Plätzen	126

Tab. 3-2.6 Ableitung des relevanten Zielmarkts¹⁴

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 126 Pflegebetriebe als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-2.7):

¹² Gesundheitsberichtserstattung des Bundes (www.qbe-bund.de). Datenbezug: 2007.

¹³ Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit durch die Pflegeheime. Bei durchschnittlichen Investitionen von ~ 1 000 pro Pflegeplatz (Schätzung siehe Abschnitt 4.2.2) stehen Betrieben mit 200 und mehr Plätzen Mittel von > 100 000 Euro zur Verfügung - es wird davon ausgegangen, dass erst ab dieser Größenordnung genügend Mittel für SR-Investitionen übrig bleiben.

¹⁴ Statistisches Bundesamt (2008)

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme ist nicht direkt verfügbar. Aus den Daten des Gesundheitsberichts des Bundes geht jedoch hervor, dass 2006 ~9,0 Mrd Euro in Gebäude und Anlagen investiert wurden. Auf dieser Grundlage kann abgeschätzt werden, dass auf die Betriebe der stationären Pflege ~716,9 Mio Euro entfielen.¹⁵
- Als Bezugsgröße zur Abschätzung der Investitionen je Pflegeheim eignen sich die verfügbaren Plätze. Bei 799 059 verfügbaren Plätzen ergibt sich demnach eine Investition von ~897 Euro/Platz. Bei einer geschätzten Anzahl von ~33 100 Pflegeplätzen ergibt sich eine Bruttoinvestitionssumme von ~29,7 Mio Euro in Pflegeheimen mit mehr als 200 Plätzen.¹⁶
- Es wird geschätzt, dass etwa 10% dieser Summe in technische Ausrüstungen und Anlagen investiert werden (~2,97 Mio Euro).¹⁷ Weiterhin wird geschätzt, dass davon wiederum 25% für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen könnten (~742 Tsd Euro).¹⁸
- Bei einem Systempreis von Tsd Euro 152,4 (SR-Variante A) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~5 Serviceroboter-Systemen führen – was letztlich zu einer Installed Base von 60 Serviceroboter im eingeschwungenen Marktzustand führen würde (Lebensdauer 12 Jahre). Für SR-Variante B ergeben sich Werte von 10 Servicerobotern pro Jahr bzw. 120 Servicerobotern als Installed Base.

¹⁵ Schätzung basierend auf der Annahme, dass sich die Investitionen proportional zu den Ausgaben verhalten. Diese betragen 2006 im Bereich der stationären Pflege 18,8 Mrd Euro bei 236 Mrd Euro Gesamtausgaben im Gesundheitssystem (vgl. Tab. 3-2.4; ohne Investitionsanteil).

¹⁶ In Ermangelung geeigneter Daten der Pflegeplätze nach Pflegeheim-Größenklassen ist auch die Gesamtzahl der Pflegeplätze in Heimen mit mehr als 200 Plätzen zu schätzen: Die Statistiken unterscheiden im relevanten Größenbereich nur zwischen Pflegeheimen mit 201 – 300 Plätzen (110 Betriebe) sowie mit 301 und mehr (16 Betriebe). Daraus ergibt sich eine Schätzung von 250 Plätze * 110 Betriebe + 350 Plätze * 16 Betriebe

¹⁷ Ermangelung geeigneter Daten. Da angenommen wird, dass der Großteil der Investitionen in Gebäude bzw. gebäudespezifische Ausrüstungen investiert wird, werden die technischen Ausrüstungen auf einem niedrigen Niveau angesetzt.

¹⁸ Ermangelung geeigneter Daten. Da jedoch die SR-Lösungen bestehende Geräte ersetzen und damit keine zusätzlichen Bedarfe auslösen, wird ein hoher Anteil angesetzt.



01



02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 4 MARKTDATEN

- Diese Werte sind allerdings nur als obere Grenzen für das Marktpotenzial zu sehen – ihr Erreichen setzt eine nach den Maßstäben der Branche positive Wirtschaftlichkeitsbetrachtung voraus. Aufgrund der eher negativen LCC-Betrachtung der hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsfelder (vgl. Abschnitt 3.1) kann das hier errechnete Marktpotenzial nur langfristig und unter der Voraussetzung weiterer Kostenoptimierungen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Da allerdings der Kostenabstand im Vergleich zur rein manuellen Leistungserbringung in beiden Varianten weniger als 10% beträgt, wird eine „mittlere“ Ausschöpfung des errechneten Absatzpotenzials für realistisch gehalten.

Relevante Betriebe	~126
Brutto Investitionssumme (T€)	~29 690,73
davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~2 969,1
davon SR Potenzial (T€)	~742,3

Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR Systempreis T€ 152,4 / 73,9; 1 SR pro System)	5 880
• errechnet	~5 / 10
• real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~2 / 5

Errechneter max. Bestand an SR (12 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
• errechnet	~60 / 120
• real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~24 / 60

Tab. 3-2.7 Ableitung des Marktpotenzials (Eigene Schätzungen)





BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Aufgrund des hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsszenarios kann keine der SR-Varianten günstiger sein als die manuelle Erbringung – es handelt sich um eine reine Unterstützungsaufgabe bei einer Nebentätigkeit, die zu keiner Produktivitätserhöhung führt.
- Die LCC-Betrachtungen zeigen jedoch deutlich, dass die zu erwartende Entlastung von ~ 800 h/a (~ 0,5 M/a) auf Ebene der Prozesskosten lediglich einen Kostenaufschlag von 10% bedeutet. Wollte man eine vergleichbare Entlastung durch zusätzliches Personal erreichen, dann würden im Jahr zusätzlich 0,5 M/a anfallen (~ 13 Tsd Euro)¹⁹. Diese Ersparnis müsste im Vergleich der SR-Varianten als Ersparnis gewertet werden und würde im Laufe der Lebenszeit von 12 Jahren gerade so eine Amortisation der Serviceroboter-Lösungen zu lassen – im Falle von Lohnkostensteigerung sogar wesentlich früher.
- Gerade im Bereich Pflege ist die Investition in Serviceroboter aufgrund der sich verschlechternden Rahmenbedingungen aber auch aus einem anderen Blickwinkel zu bewerten: Auf der einen Seite wird der demografische Wandel zu einer weiteren Erhöhung des Leistungsbedarfs führen, auf der anderen Seite ist mit einer Verschärfung des Arbeitskräftemangels zu rechnen. Die physische und psychische Belastung des Personals werden zunehmend zu einem Problem – insbesondere wenn dadurch die Leistungsqualität nachlässt. Durch die hier vorgeschlagenen Serviceroboter-Lösungen kann eine signifikante Entlastung des Personals bei ggf. sogar gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsqualität erreicht werden.

Vor diesem Hintergrund könnten sich zwar hohe Marktpotenziale ergeben, allerdings nur unter den Voraussetzungen, dass

- die Serviceroboter aufgrund des Fachkräftemangels bei gleichzeitig zunehmenden Leistungsvolumen die einzige Möglichkeit für Produktivitätsgewinne darstellen,
- die Zusatzkosten auf die Träger des Gesundheitssystems umgelegt werden können

- die Finanzierungsfähigkeit durch die Träger der Pflegeheime gegeben ist – dies könnte sich gerade für öffentliche, kommunale Trägergesellschaften als schwierig herausstellen.

Aufgrund des insgesamt geringen Kostenabstands wird mit einer mittleren Ausschöpfung der Marktpotenziale gerechnet – eine hohe Ausnutzung des Marktpotenzials wird langfristig für wahrscheinlich gehalten.

5.2 Forschungsbedarf

Erheblicher Forschungsbedarf besteht für dieses Serviceroboter-Anwendungsszenario in der Erkennung, Lokalisierung und dem sicheren Greifen unterschiedlichster Objekte sowie dem einfachen automatischen Einlernen neuer Objekte durch das Personal vor Ort. Existierende Objekterkennungslösungen, die auch auf neue Objekte eingelernt werden können, sind bisher nur unter klar definierten Laborbedingungen einsetzbar und für die industrielle Umsetzung nicht geeignet. Herausforderungen sind insbesondere:

- Robuste und zuverlässige Erkennung auch bei wechselnden Lichtverhältnissen, ständig wechselnden Hintergründen und teilweiser Verdeckung der Objekte
- Entwicklung eines generellen Verfahrens, das Objekte mit unterschiedlichsten Merkmalen erkennt (z.B. auch einfarbige rotationssymmetrische Objekte wie Becher). Dafür muss die Erkennung anhand von unterschiedlichen Erkennungsparametern möglich sein (Farbe, Form, Textur, etc.)
- Einfaches Einlernen neuer Objekte (sowohl Form als auch Griffe)
- Genaue Erkennung in Position und Orientierung wird ohne die Fusionierung mehrerer Objektansichten (z.B. Roboter fährt um das Objekt herum) kaum möglich sein (besonders bei kleinen Objekten), da manche Objekte durch Verdeckung nur aus bestimmten Blickwinkeln gesehen werden.

¹⁹ Mindestlohn 10 Euro/h + 50% Nebenkosten; 220 Arbeitstage à 8 Stunden.



BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 5 FAZIT

- Die Erkennung biegeschlaffer Teile steckt noch in den Kinderschuhen, da keine konkrete Form eingelernt werden kann. Hier muss ein Klassifikator entwickelt und trainiert werden (Verfahren des Maschinellen Lernens), der von wenigen gelernten Formen auf alle anderen auftretenden Formen generalisieren kann. Dazu ist im Moment noch ein manuelles und aufwändiges Entwickeln von Deskriptoren nötig.

Eine weitere bedeutende Rolle spielt die kollisionsfreie Bewegung von Roboterarm und Greifer. Die sensorbasierte Umgebungserfassung und -modellierung in Echtzeit und die darauf aufbauende Planung kollisionsfreier Trajektorien stellen insbesondere die folgenden Herausforderungen:

- Segmentierung einer Punktwolke in einzelne Objekte: ungenaue Sensordaten, nur teilweise Sicht auf die Umgebung; Tischplatten sind z.B. schwierig, weil die Sensoren typischerweise schräg darauf schauen, damit werden nur wenige Messwerte erfasst, was die Ebenenextraktion erschwert.
- Es gibt bisher wenig Strategien, das Modell sinnvoll zu aktualisieren: welche Gebiete ändern sich häufig und müssen öfters observiert werden? An welchen Stellen benötigt man eine höhere Modellgenauigkeit (z.B. dort, wo man manipulieren will)?
- Bei Objekten im Regal sieht man nur die Front, Hindernisse beim Greifen können verdeckt sein (durch Umgebung oder Roboterarm), also ist eine Strategie für das Greifen verdeckter Objekte nötig.
- Unterscheidung zwischen manipulierbarem Objekt und Hindernis. Objekterkennung liefert Objektpose, das Objektmodell muss vom Umgebungsmodell subtrahiert werden, wenn man eine kollisionsfreie Planung machen will.
- Existierende Pfadplanungsalgorithmen sind meist relativ langsam, so dass sie nicht für ein schnelles Umplanen in dynamischen Umgebungen geeignet sind (Genauigkeit vs. Geschwindigkeit).
- Zwangsgeführte Bewegungen (z.B. Manipulation von Schubladen und Schränken) erfordern die präzise Koordination von Roboterarm- und Plattformbewegungen.

Des Weiteren stellt das Auswählen geeigneter Griffe für die unterschiedlichen Objekte und deren daraus resultierende Manipulation eine Herausforderung dar, insbesondere:

- Greifpunktbestimmung bei unvollständigen Sensordaten z.B. bei Verdeckung des zu greifenden Objekts, bzw. Manipulation von unbekanntem Objekten
- Verfügbare State-of-the-art Algorithmen zur Erstellung von Griffstabellen erfordern genaue 3-D-Modelle der zu greifenden Objekte, so dass es bisher schwierig ist, online das Greifen neuer Objekte zu lernen
- Überwachung des Greifvorgangs (korrekt gegriffen?)

Neben den genannten Einzeltechnologien kommt der Integration der einzelnen Komponenten eine essentielle Rolle zu. Die benötigte kollisionsfreie Manipulation in dynamischen Umgebungen erfordert die Koordinierung und Integration mehrerer eng verzahnter Komponenten: Objekterkennung, Greifplanung, Pfadplanung (Roboterarm und Plattform), Umgebungs-/Hindernismodellierung und online Kollisionsüberwachung. Dies beinhaltet auch eine komplexe Fehlerbehandlung, z.B. die mobile Plattform zu repositionieren, falls von der aktuellen Position kein geeigneter Griff möglich ist.



01



02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEREITSTELLEN VON PFLEGEUTENSILIEN

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B / Roboter	SR-Variante B / Lager
Mobile Plattform mit Differentialantrieb	50 000 €	20 000 €	
3x O2DIRPKG/K von ifm electronics	1 200 €	1 200 €	
1x Sick S300	3 000 €	3 000 €	
Magazin und Bereitstellungsmechanismus	5 000 €	5 000 €	
1x SwissRanger von mesa	6 000 €	-	6 000 €
Stereo Kamerasystem (AVT Pike 145 C)	6 000 €	-	6 000 €
4 Schunkmodule	20 000 €	-	
Portalroboter		-	50 000 €
Schlüter ISWA (Linealachse)	5 000 €	-	
2-Finger-Greifer mit integriertem Visionsystem	15 000 €	-	15 000 €
6-D-Force-Torque Sensor (Schunk/ATI)	6 000 €	-	6 000 €

Tab. 3-2.8 Anschaffungskosten



SZENARIOSTECKBRIEF

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE



03



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Für das Bewegen der Bewohner im Pflegeheim steht dem Pflegepersonal aktuell eine Vielzahl unterschiedlicher Liftersysteme zur Verfügung. Das Bewegen von Personen umfasst u.a. den Transport:

- vom Bett in den Rollstuhl und zurück,
- vom Zimmer zum Bad und zurück,
- in die / aus der Badewanne oder Dusche.

Je nach Gebrechen der betroffenen Person kann diese in sitzender oder liegender Form transportiert werden.

Üblicherweise stehen für die unterschiedlichen Einsatzbereiche separate Liftersysteme zur Verfügung. Insbesondere wird unterschieden zwischen:

- Hänge- oder Gurtlifter. Sie werden üblicherweise für den Transfer zwischen Bett und Rollstuhl eingesetzt (Abb. 3-3.2, links), Preis ab 1 000 Euro
- Lifter mit Plastikauflagen / austauschbaren Auflagen für sitzende und liegende Patienten oder 2 verschiedene Geräte (Abb. 3-3.2, Mitte) werden z.B. zum Baden eingesetzt, Preis ab 800 Euro (einfacher Sitzlifter) bzw. 1 500 Euro (Liegelifter)
- Einer der fortschrittlichsten verfügbaren Lifter (Abb. 3-3.2, rechts) unterstützt das Pflegepersonal auf dem Weg zum Bad durch motorisierte Räder, Steuerung per Handbedienung, Preis ca. 7 000 Euro

Aufgabe des Pflegepersonals ist die Bedienung des entsprechenden Lifters sowie die Durchführung der notwendigen Vorbereitungen für die Patientenaufnahme, z.B. das Anbringen des Netzes am Patienten für den Patiententransfer mit dem

Hängelifter oder die Bewegung des Liegelifters zur Badewanne oder Dusche und in sie hinein. Dabei müssen durch das Pflegepersonal einige zusätzliche Aufgaben wahrgenommen werden, die es oftmals erforderlich machen, dass eine zweite Pflegekraft den Vorgang unterstützt, z.B.:

- Lifthöhe verstellen,
- Beine der Person hochheben,
- Person zusätzlich halten,
- Person beruhigen.

Besondere Problematik bei schwergewichtigen Personen:

- Person drehen, um Netz unterzulegen / Person bewegen

Badelifter stehen üblicherweise im Pflegebad bereit, z.T. auch

- Einsatz eines Lifters in mehreren Bädern, üblicherweise ca. 2 verschiedene Lifter pro Station, die oft auch mit anderen Stationen ausgetauscht werden
- Transfer der Bewohner vom Zimmer zum Bad mit Hilfe des Lifters (üblicherweise jedoch im Rollstuhl)

Weitere Eckdaten, die entsprechend der durchgeführten Analyse vor Ort und den durchgeführten Expertengesprächen identifiziert wurden:

- 1 Badeeinrichtung wird für ca. 20 Bewohner genutzt. Bewohner werden einmal wöchentlich gebadet, somit pro Bad ca. 4-5 Personen täglich, Dauer pro Bewohner mindestens 45 Minuten (20 Minuten im Wasser, 10-15 Minuten Transfer, Rest für Vor-/Nachbereitung wie z.B. Kleidung ausziehen, Haare föhnen etc.)





BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Sequenzdiagramm

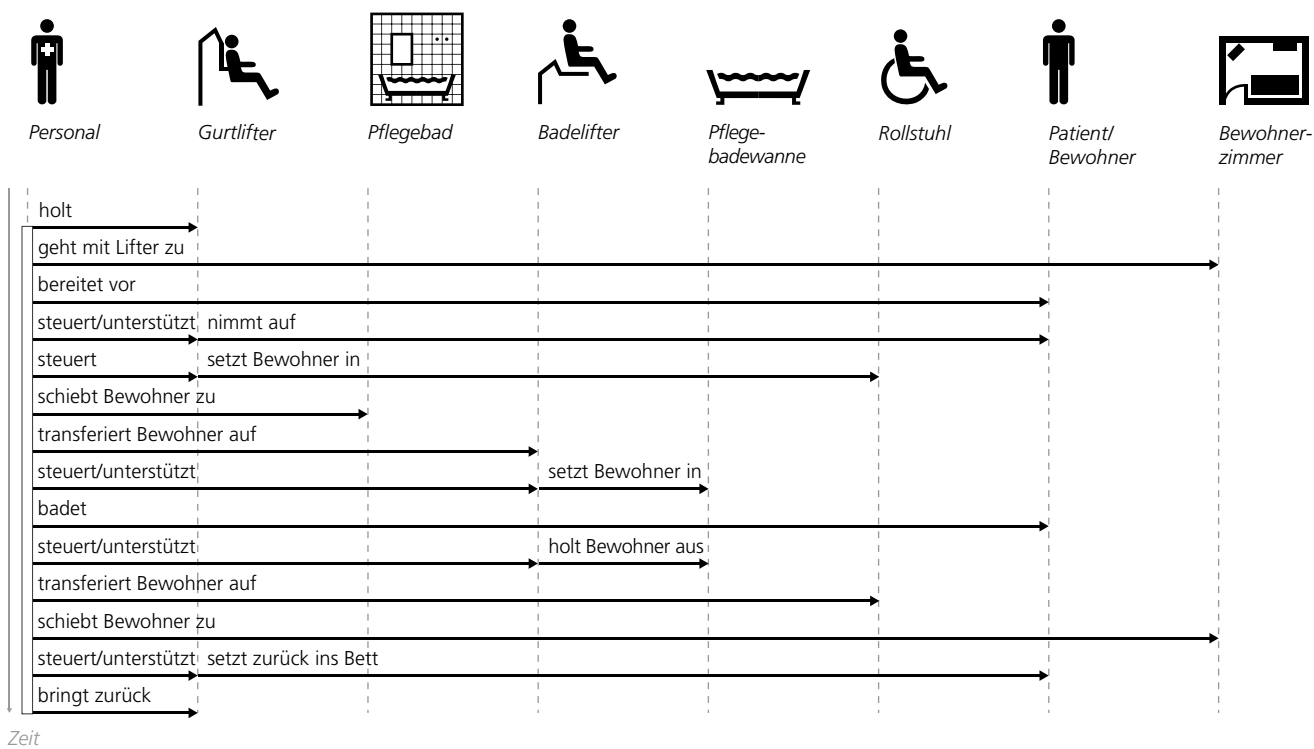


Abb. 3-3.1 Typische Prozesse beim Bewegen von Personen („worst case“ ohne motorisierten Lifter)

Separate Liftersysteme



Abb. 3-3.2 Hängelifter mit und ohne Person (links), handelsüblicher Sitzbadelifter (Mitte), motorisierter Liegebadelifter (rechts). Quelle: Arjo Huntleigh



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.2 Probleme

Eines der größten Probleme in der Pflege stellt die hohe physische und psychische Belastung der Pflegekräfte dar. Ursachen dafür sind der Personalmangel und die damit verbundene Zeitknappheit bei der Versorgung der Bewohner / Patienten sowie der zunehmende Mangel an Fachkräften. Bis 2050 wird eine Verdreifachung des Bedarfs an professionellen Pflegekräften prognostiziert¹, bei gleichzeitiger Abnahme der Zahl berufstätiger Personen. Durch den Wegfall der Zivildienstleistenden wird die Situation weiter verschlimmert.

Bezüglich des Bewegens von Personen treten entsprechend der durchgeführten Analyse vor Ort und den stattgefundenen Expertengesprächen folgende Schwierigkeiten auf, die eine zusätzliche Belastung des Pflegepersonals darstellen:

- Es gibt keinen Allzweck-Lifter: Transfer in liegender (Bett) und sitzender (Rollstuhl) Form, für Personentransport (z.B. zum Bad), wasserfest (Badewanne / Dusche) etc. Also wird eine große Anzahl verschiedener Geräte benötigt, diese müssen oft transferiert / geholt werden, aus Zeitmangel werden Personen deshalb oft manuell bewegt.
- Teilweise wird für das Bewegen von Personen auch mehr als ein Pfleger benötigt (z.B. bei schwergewichtigen Bewohnern), oft versucht das Personal es jedoch alleine, was wiederum zu gesundheitlicher Belastung führt, z.B. häufige Rückenprobleme.
- Hängelifter für den Patiententransfer steht oft nicht zur Verfügung bzw. muss aus einem anderen Raum geholt werden. Zusätzlicher Zeitaufwand 5 – 10 Minuten. Verwendung der Lifter im Bad wird durch Badeplan geregelt, hier tritt Mangel an Liftern eher selten bzw. nur in außergewöhnlichen Situationen auf.
- Eine Hand ist immer mit dem Bediengerät belegt, sie steht also nicht für den Patienten zur Verfügung.

Auswirkungen der hohen Belastung der Pflegekräfte:

- Krankenpflegehelfer: Durchschnittlich 25 Krankheitstage pro Jahr (zweithöchste Zahl von allen Arbeitsgebieten).²
- Drei häufigste Ursachen für den Krankenstand: Erkrankungen des Muskel- und Skeletapparates, Erkrankungen der Atmungsorgane und psychische Erkrankungen.³
- Zusätzliche Verschlechterung auch wegen des demographischen Wandels auf Arbeitskräfte-seite, Stichwort „alternde Belegschaft“.
- Berufsverläufe von Pflegekräften sind durch häufige Arbeitsunterbrechungen geprägt, mit zunehmendem Alter nehmen sowohl die durchschnittlichen Beschäftigungszeiten als auch die Unterbrechungszeiten zu.⁴

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

- Ein autonom navigierender Lifter stünde immer zur Verfügung bzw. könnte bei Bedarf einfach angefordert werden.
- Ein Multifunktionslifter, der die Aufnahme, den Transport sowie das Baden / Duschen von Personen ermöglicht, könnte die Anzahl der insgesamt benötigten Geräte erheblich reduzieren.
- Eine teilautomatische Aufnahme von Personen mit sensorbasierten Unterstützungsfunktionen (z.B. Personenlageerkennung, Bewegungsanpassung) könnte die Anzahl der benötigten Pfleger und die körperliche Belastung der Pflegekräfte bei der Personenaufnahme reduzieren.

¹ Schnabel, R.: Studie „Zukunft der Pflege“. Universität Duisburg-Essen und ZEW. 02.05.07, www.insm.de

² Spiegel-Studie über Fehlzeiten: „Welche Jobs krank machen“, <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/0,1518,705576,00.html>

³ BGW-DAK. Gesundheitsreport 2003, Altenpflege

⁴ Projekt „Berufsverläufe von Altenpfleger/innen“, IWAK, 2009, <http://www.iwak-frankfurt.de/projansprech/Berufsverbleib.htm>



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Die Anwenderbranche „stationäre Altenpflege“ ist insbesondere durch aktuelle und prognostizierte demographische Entwicklungen geprägt (siehe auch Szenario Bereitstellen von Pflegeutensilien [Kapitel 3.2](#)).

- Aktuelle Trends ^{5,6}
 - Der Anteil der über 80-Jährigen wird sich bis 2060 nahezu verdreifachen.
 - Gleichzeitig sinkt der Anteil der Personen im erwerbsfähigen Alter, 2060 werden etwa doppelt so viele Personen im Rentenalter auf 100 Personen im Erwerbsalter entfallen wie heute.
 - Der Anteil der Pflegebedürftigen an der Gesamtbevölkerung: 2,6% heute; Anstieg bis 2020 auf 3,6% und bis zum Jahr 2030 auf 4,4%.
 - Aufgrund der mangelnden Zahl an pflegenden Angehörigen wird die Pflege im Heim in naher Zukunft zur häufigsten Versorgungsform werden und nahezu die Hälfte aller Pflegefälle umfassen.
 - Alternativ: neue Pflegeformen, die es den Pflegebedürftigen ermöglichen, länger zuhause zu leben. Beispiele: Wohngemeinschaften, Mehrgenerationenhäuser, Stadteilentwicklung
- Unterschiedliche Träger von Pflegeeinrichtungen sind zu beachten, daraus ergeben sich unterschiedliche Entscheider bezüglich der Investitionen sowie unterschiedliche Budgets.
- Größe der Pflegeeinrichtungen stark variabel, durchschnittlich leben in einem Heim 60 – 65 pflegebedürftige Personen⁷.

- Größter Kostentreiber sind Personalkosten (ca. 70%), höhere Prozentsätze im ambulanten Bereich (mehr als 90%), geringere im Krankenhaus. In stationären Altenpflegeeinrichtungen entfallen ca. 20% für den Sachaufwand.

1.4.2 Einsatzbereich

- Altenheime, Altenpflegeeinrichtungen, ggf. Betreutes Wohnen. Stationäre Einrichtungen, in denen eine Pflegekraft mehrere Bewohner im gleichen Gebäude versorgt. Kaum ambulante Dienste.
- Üblicherweise große Gebäude, behindertengerecht eingerichtet (eben, breite Gänge, Rampen, Aufzüge etc.)
- Zentrale Aufgabe: Sicherstellung einer angemessenen Pflegequalität. Der Medizinische Dienst der Krankenversicherung MDK evaluiert diese in seinen Prüfungen anhand der Zufriedenheit sowie dem körperlichen Zustand der Betroffenen.⁸

⁵ Statistisches Bundesamt 2009, www.destatis.de

⁶ Schnabel, R.: Studie „Zukunft der Pflege“. Universität Duisburg-Essen und ZEW. 02.05.07, www.insm.de

⁷ Burger, F.; Weber, M.: Deutlicher Zuwachs an Pflegebedürftigen und Pflegeeinrichtungen: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 4/2009, <http://www.statistik-portal.de/>

⁸ MDK – Medizinischer Dienst der Krankenversicherung zum Thema „Pflegequalität“, <http://www.mdk.de/323.htm>



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Der Serviceroboter, in diesem Anwendungsfall ein teilautonomer Multifunktionslifter, übernimmt folgende Aufgaben:

- Autonome Fahrt zum Einsatzort (immer ohne Patienten) in besonders kompakter Form. Anforderung mittels Handheld oder Telefon.
- Teilautonome Patientenaufnahme durch automatische Anpassung der Armpositionen.

- Intuitives Bewegen des Lifters durch an geeigneter Stelle angebrachte Steuerknöpfe oder -hebel, einfache und entlastende Bedienung durch nur einen Pfleger.
- Anpassung der Form für die Aufnahme, den Transport, das Baden oder das Duschen sitzender bzw. liegender Personen.

Sequenzdiagramm

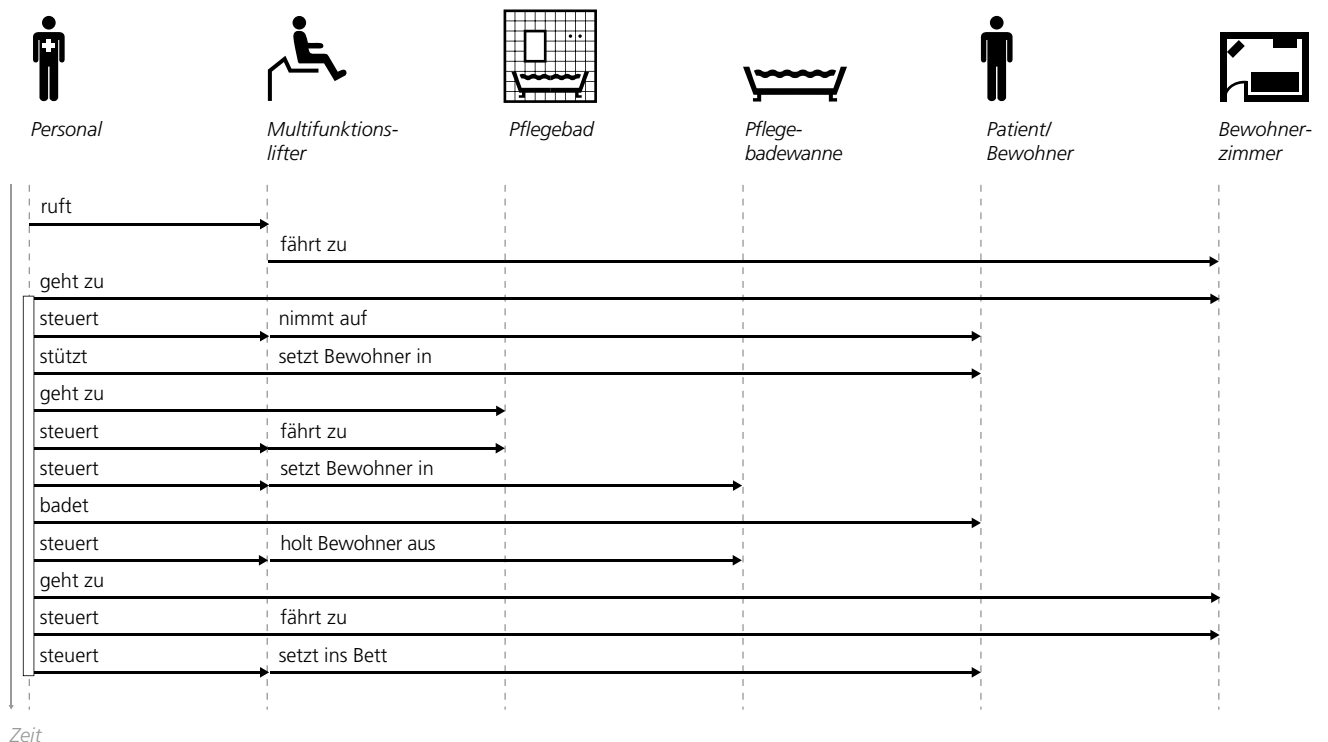


Abb. 3-3.3 Sequenzdiagramm in der Versorgung mit Serviceroboter, hier Multifunktionslifter.



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2 Roboterentwurf

Der Serviceroboter orientiert sich bzgl. Größe und Gesamtaufbau an existierenden Liegeliftern, kann jedoch aufgrund seiner veränderlichen Form auch als Sitzlifter oder für die Aufnahme von Personen aus dem Bett eingesetzt werden. Für die autonome Fahrt zum Einsatzort oder das platzsparende Abstellen kann der Multifunktionslifter in eine besonders kompakte Form gebracht werden (Faltung).

Roboterentwurf

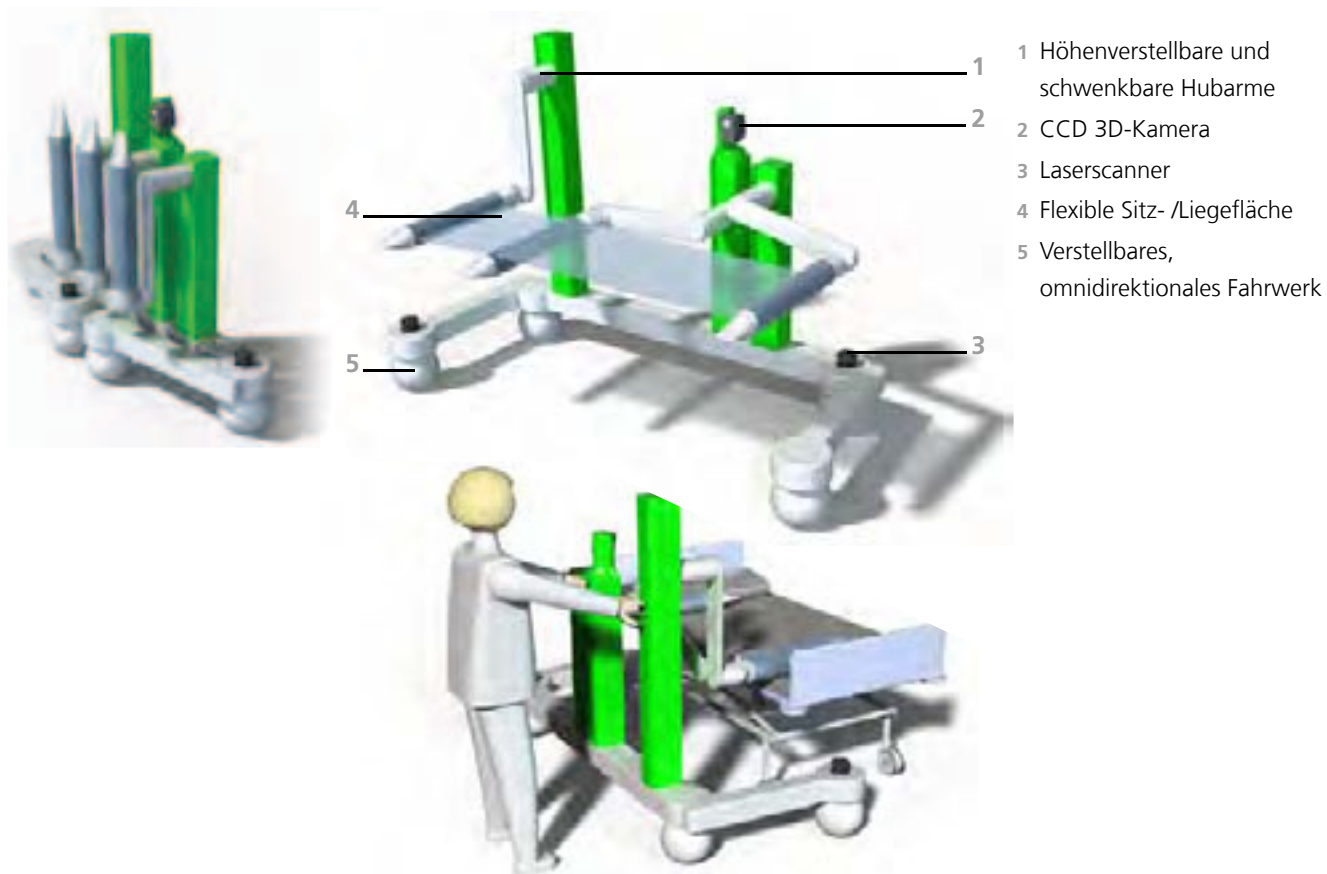


Abb. 3-3.4 Komponenten des Multifunktionslifters.



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

RIBA



Abb. 3-3.5 Prototyp RIBA bei der Personenaufnahme. Quelle: RIKEN-TRI Collaboration Center for Human-Interactive Robot Research

Für die eigenständige Fortbewegung des konzipierten Multifunktionslifters z.B. für die Fahrt zum Patientenzimmer sowie für eine optimale Manövrierbarkeit in engen Bereichen wie z.B. im Bad ist der Roboter mit omnidirektionalen Fahrtriebwerken ausgestattet. Das Aufnahmesystem für sitzende oder liegende Personen besteht aus drei seitlich und in der Höhe verstellbaren Armen, zwischen denen zur Stabilisierung der Patienten während der Fahrt stabile Netze gespannt werden können. Die Steuerung erfolgt mit Hilfe verschiedener an den Hubarmen angebrachter Bedienelemente. Die Personenaufnahme und Stabilisierung in sitzender oder liegender Position wird folgendermaßen umgesetzt:

- Vorpositionierung der Arme (2 beieinander, einer separat), keine Netze gespannt, ein Netz ist zwischen den zwei beieinanderliegenden Armen bereits verbunden
- Arme von der Seite an die Person heran fahren: zwei Arme unter die Knie und ein Arm an den Rücken. Die Personenaufnahme orientiert sich an der Funktion des Prototypen RIBA vom japanischen RIKEN-Institut (Abb. 3-3.5). Personelageerkennung mittels 3-D-Sensorik unterstützt die korrekte Positionierung der Arme durch das Pflegepersonal.
- Person anheben
- Mittleren Arm an den Rücken fahren, dabei Spannen des ersten Netzes. Abstandssensoren ermöglichen die berührungslose Bewegung des mittleren Arms entlang der aufgenommenen Person.
- „Andocken“ des Netzes / Übergabe des zweiten Netzes an den Arm am Rücken
- Arm am Rücken hochfahren, dabei Spannen des zweiten Netzes zum Kopf.
- Mittleren Arm herunterfahren bis hinter den Po als Basis für eine gerade Sitzfläche.
- Für eine liegende Position den äußeren Arm in der Kniekehle bis unter die Beine fahren bei gleichzeitigem Absenken des Arms am Rücken.

i





01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Im Rahmen des Axiomatic Design (Abb. 3-3.8, Abb. 3-3.9) wird zunächst ein marktnahes System skizziert. Es werden überwiegend ausgereifte Hardwarekomponenten eingesetzt, um eine Umsetzung mit überschaubarem Forschungs- und Entwicklungsaufwand zu ermöglichen. Im Rahmen der Variantenbildung wird eine Möglichkeit zur Reduzierung der Gesamtkosten dargestellt.

Unkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, bereits relativ günstig, nur geringe Skaleneffekte zu erwarten):

- Kommunikationsinfrastruktur WLAN (Weiterentwicklungen münden meist in Leistungssteigerungen statt Kostenreduzierung; langfristig eröffnen sich hier Möglichkeiten, rechenintensive Operationen auszulagern)
- Bedienelemente (KMS, Joystick, Regler) zur einfachen Steuerung des Roboters durch die Pflegekraft

Systemkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, nur geringe Skaleneffekte zu erwarten, sehr teuer, Alternativen dringend nötig):

- Navigationssensorik
 - Laser 2-D (Laserentfernungsmesser zur sicherheitstechnischen Überwachung, z.B. Sick S300 oder Navigation z.B. Sick NAV)
 - Reflektorbasierte Lasersysteme zur Positionsbestimmung derzeit teuer ~7 000 Euro
 - Kosten für Installation (Anbringen und Einmessen der Marker)
 - Sicherheitssensoren ebenfalls sehr teuer, 2 mal Sick-S300 ebenfalls ~6 000 Euro
 - Forschungsarbeiten: Nutzen von Sicherheitssensoren im Kontext mit natürlichen Markern, die die Modifikation der Umgebung und zusätzliche Navigationssensoren einsparen)
- 3-D CCD-Kamera mit geringer Auflösung, z.B. Typ O2DIRPKG/K von ifm

- Aktives Messsystem (moduliertes Infrarotlicht)
- geeignet für Volumen-Kollisionsschutz (in Fahrbereich hinein ragende Hindernisse)
- Kosten pro Einheit ~400 Euro
- Öffnungswinkel 40° x 30°, also sind mehrere Systeme notwendig (4 - 6)
- Derzeit keine Sicherheitszertifizierung; begrenzte Auflösung; Probleme bei schnellen Bewegungen
- Günstige Alternative: Ultraschall, aber zu störungsanfällig für autonomes System mit hoher Verfügbarkeit
- Erkennungssensorik
 - 3-D CCD-Kamera mit hoher Auflösung, z.B. SwissRanger von mesa oder CamCube von pmd
 - Aktives Messsystem (moduliertes Infrarotlicht)
 - geeignet für Personenlageerkennung im genannten Messbereich
 - Kosten pro Einheit ~6 000 Euro

Systemkritische Komponenten ohne (Serien-)Produktstatus (Spezialanfertigungen, keine vereinheitlichten Produktionsprozesse, Skaleneffekte zu erwarten):

- Omnidirektionales Antriebssystem
 - Traglast bis zu 200 kg
 - Motoren möglichst platzsparend, separat von Navigationssensorik, Rechner und Energieversorgung unter dem Lifter angebracht
 - Existierende Plattformen bestehen aus großer, oft rechteckiger Basisplattform, die Steuerrechner, Elektronik und Stromversorgung enthält, also nicht einsetzbar aufgrund funktionsbedingter Form des Roboters
 - Kompaktierbar für die Fahrt ohne Benutzer sowie platzsparende Lagerung
 - Eigengewicht und Abmessungen geeignet für Einsatz in Altenheim, also Anlehnung an Vorgaben für rollstuhlgerechte Umgebung
 - Kosten pro Antriebsmodule ~5 000 Euro





BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

TRL/€/FR-Diagramm

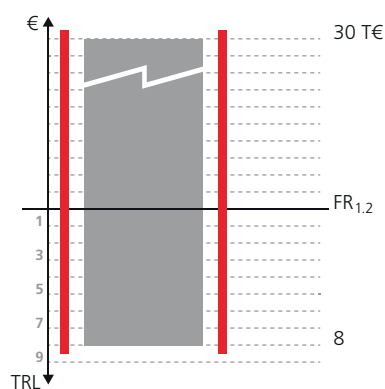


Abb. 3-3.6 TRL/€/FR-Diagramm für das omnidirektionale Antriebssystem, Parameter: Positioniergenauigkeit

TRL/€/FR-Diagramm

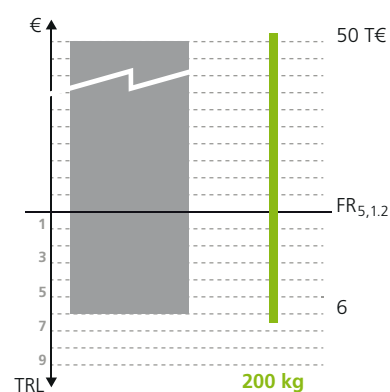


Abb. 3-3.7 TRL/€/FR-Diagramm für Aufnahme- und Transportsystem, Parameter: Traglast

- Aufnahme- und Transportsystem mit 3 3-DOF Armen und Netzen zur Stabilisierung der zu befördernden Person, z.B. Schunk LWA-Module gekoppelt mit Schlüter Linearachsen
 - Traglast 50 – 200 kg
 - Stufenlos verstellbar, ermöglicht Einstellung benutzerspezifischer Sitz- und/oder Liegepositionen
 - Netze können in den Armen versenkt werden, z.B. zur einfachen Aufnahme sitzender Personen
 - Wasserfest, kommt beim Baden ins Wasser
 - Kompaktierbar (Arme einklappen) für die Fahrt ohne Benutzer sowie platzsparende Lagerung
 - Kosten pro Einheit (also pro DOF) ~5 000 Euro



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

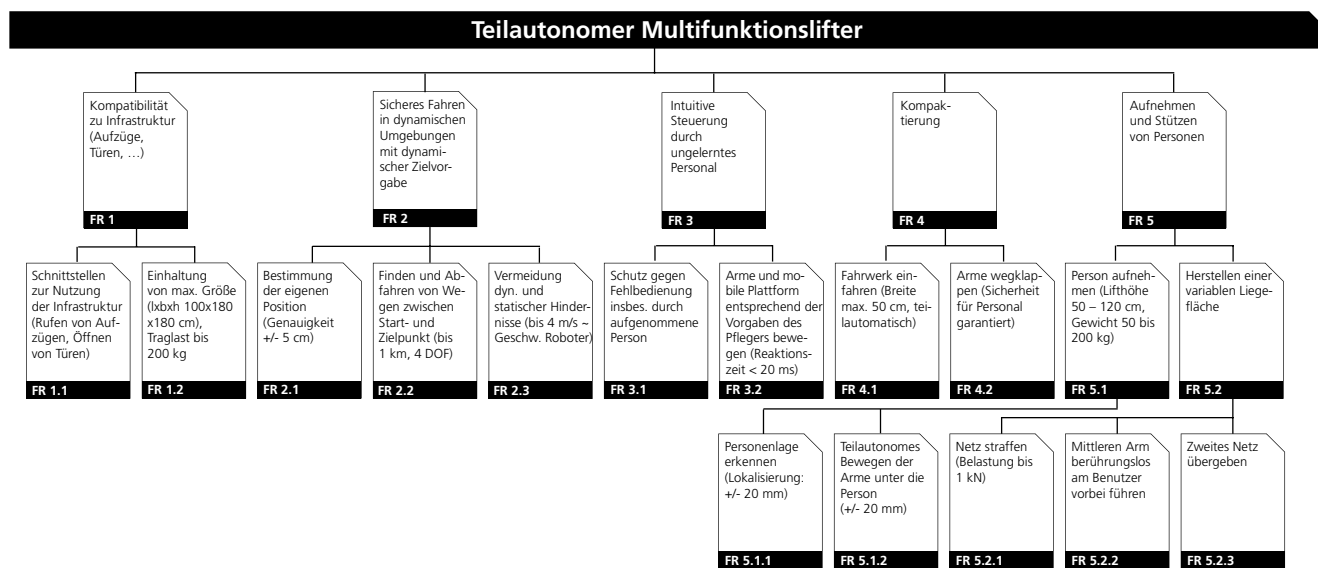


Abb. 3-3.8 Axiomatic Design – Functional Requirements

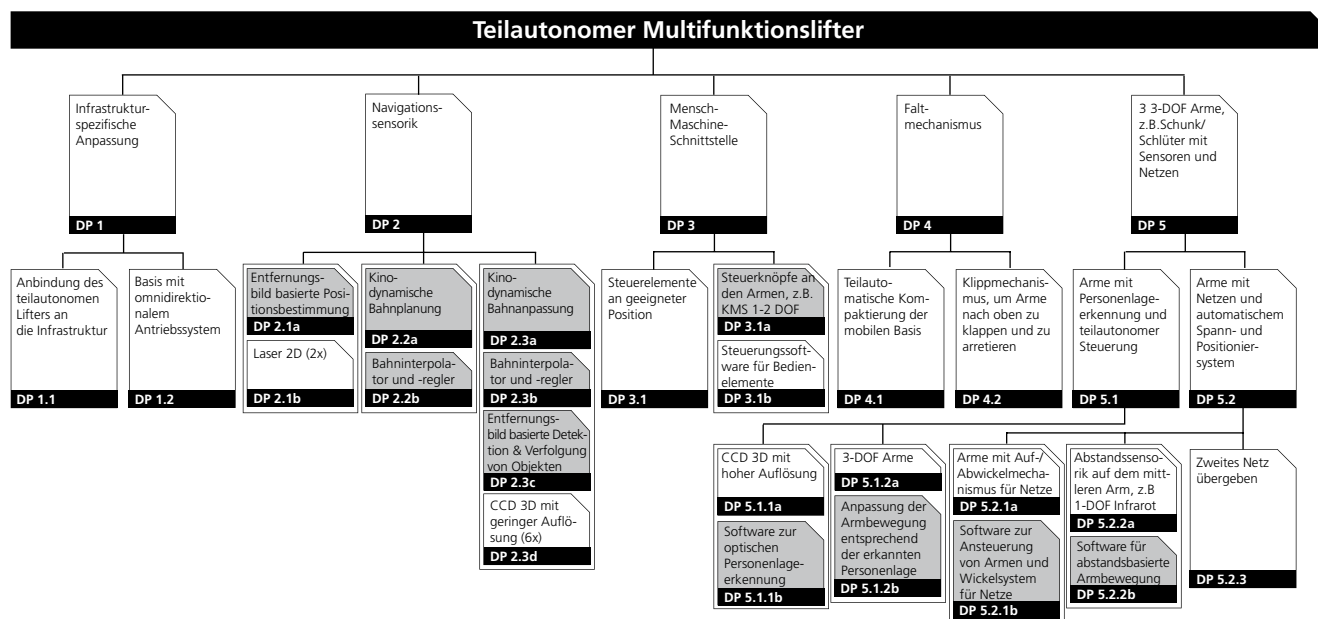


Abb. 3-3.9 Axiomatic Design – Design Parameters



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.2 Software

Folgende Softwarefunktionen werden benötigt:

- Kollisionsfreie Navigation im Raum
 - Bahnplanung zu vorgegebenem Ziel
 - Vermeidung unterschiedlichster Hindernisse, roboterfeindliche Umgebung
 - Zuverlässiges Erkennen der Hindernisse (verschiedene Höhen, Größen und Materialien) durch Sensoren
 - Anpassung der Planung und Regelung bei geänderter Robotergeometrie (Fahrwerk eingeklappt)
 - Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig
- Steuerungssoftware für Bedienelemente
 - Einfache Bedienung mit Vermeidung von unbefugtem Bedienen
 - Manuelle Steuerung der mobilen Plattform
 - Bewegen einzelner Arme (seitwärts verfahren oder Höhe verstellen)
 - Einnehmen vordefinierter Positionen (z.B. „Sitzen“, „Liegen“, „Aufnahmeposition“)
 - Komponenten verfügbar, geringer Anpassungsaufwand
- Optische Personenlageerkennung und Anpassung der vom Benutzer vorgegebenen Steuersignale für die Arme entsprechend der erkannten Personenlage
 - Präzise Lageerkennung von Personen unterschiedlicher Körperdimensionen
 - Bewegen der Arme unter die Knie bzw. hinter den Rücken der aufzunehmenden Person, bei Bedarf Ausgleich seitlicher Plattformbewegungen
 - Eigenentwicklung notwendig, technische Komplexität hoch
- Ansteuerung der Arme und des Wickelsystems für die Netze
 - Ansteuerung der Motoren zum seitlichen Verschieben der Arme
 - Ansteuerung der Höhenverstellung / automatische Auswahl einer geeigneten Bewegung (z.B. lineare Höhenverschiebung oder Rotation des Arms mit gleichzeitiger lateraler Bewegung)

- Sensorbasierte Führung des mittleren Arms entlang des Benutzers
- Ansteuerung der Motoren für das Straffen des Netzes
- Eigenentwicklung notwendig, technische Komplexität gering
- Ablaufsteuerung
 - Steuerung des gesamten Ablaufs, insbes. Umschaltung zwischen autonomem (Zielfahrt) und benutzergesteuertem Betrieb
 - Grundkomponenten verfügbar, ablauf- und komponentenspezifische Anpassungen nötig

2.2.3 Variante

Einschränkungen für den Markterfolg des Serviceroboter-Systems resultieren insbesondere aus der fehlenden Verfügbarkeit sowie den hohen Kosten des in Abb. 3-3-8 und Abb. 3-3.9 vorgeschlagenen Aufnahme- und Transportsystems. Die vorgeschlagene Variante (SR-Variante B) nutzt deshalb anstelle von praxiserprobten, kommerziell verfügbaren Armmodulen bzw. Linearachsen eine neuartige low-cost-Kinematik als Basis für das Aufnahme- und Transportsystem sowie für das Aufwickeln der Netze. Eine weitere Einschränkung der Kosten wird durch eine Reduktion auf 2 DOF pro Arm erreicht, dadurch steigt jedoch die Komplexität der zugehörigen Softwarekomponenten, die diese eingeschränkte Beweglichkeit der Arme bei der Bewegungsplanung berücksichtigen müssen.





01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE



TRL/€/FR-Diagramm

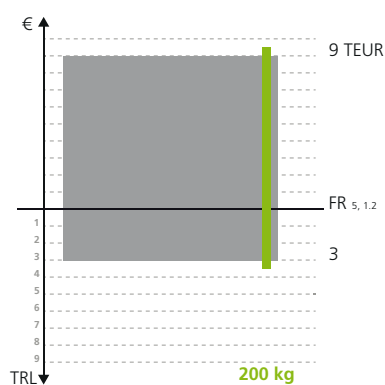
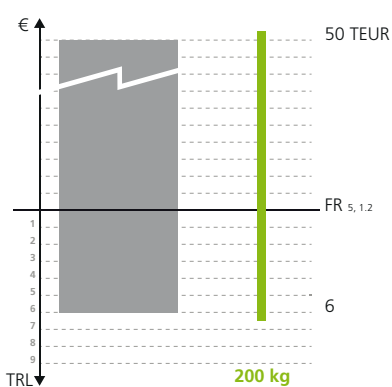


Abb. 3-3.10 TRL/€/FR-Diagramm für Aufnahme- und Transportsystem in den SR-Varianten Schunkmodule mit Linearachsen (links) und Eigenbau vom Fraunhofer IPA (rechts), Parameter: Traglast



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

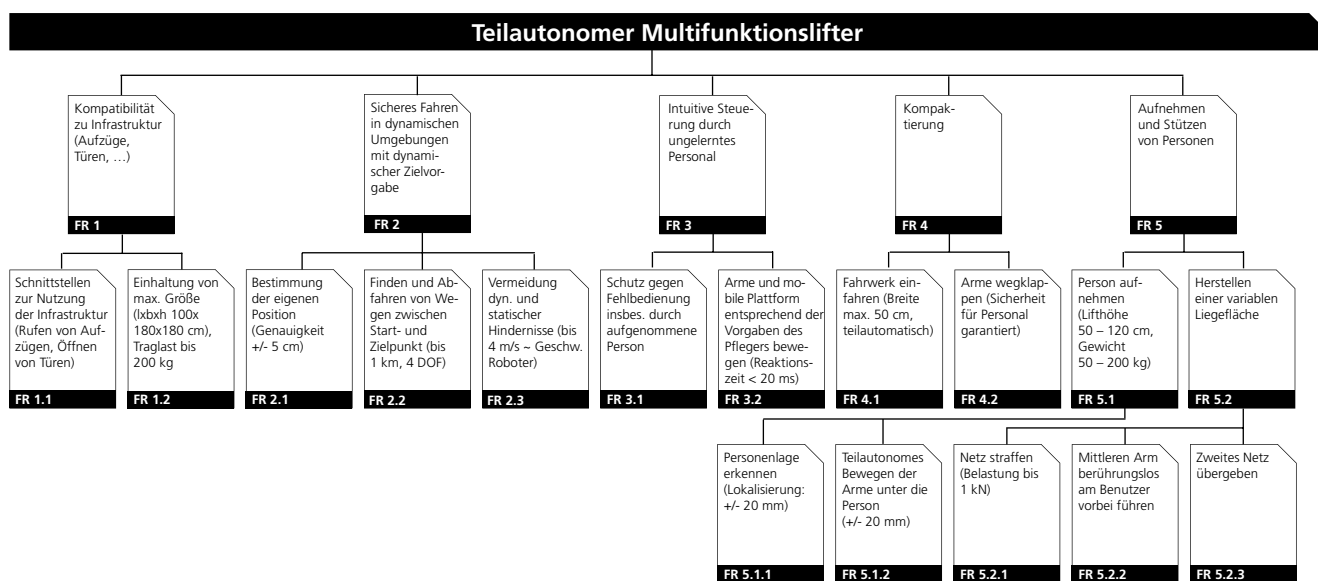


Abb. 3-3.11 Axiomatic Design – Functional Requirements SR-Variante B.

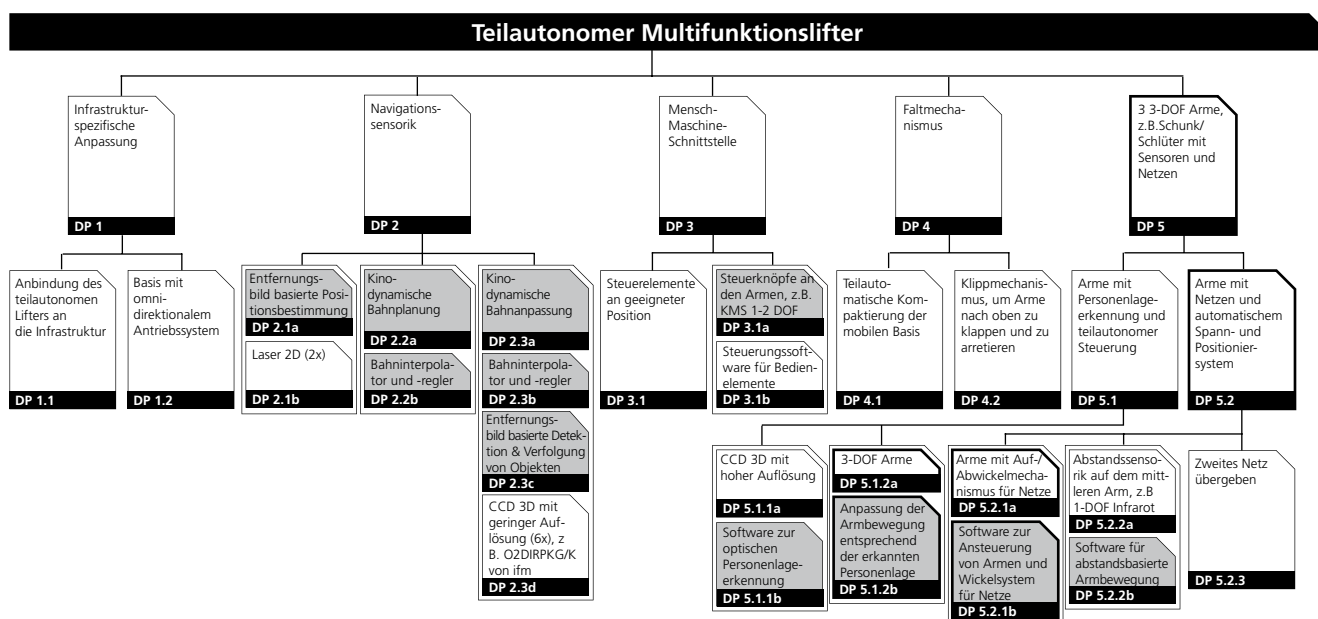


Abb. 3-3.12 Axiomatic Design – Design Parameters



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.1 Schnittstellen zur Nutzung der Infrastruktur	Kommunikation mit Aufzügen, Türen	DP 1.1 Anbindung des teilautonomen Lifters an die Infrastruktur	WLAN ist Teil der Plattform	8	1	Eingriff in die Aufzugsteuerung nicht von allen Herstellern akzeptiert, ggf. Garantieverlust
FR 1.2 Einhaltung von max. Größe und Traglast	max. Größe: lxbxh 100x180x180 cm, Traglast bis 200 kg	DP 1.2 Omnidirektionales Antriebssystem	30 000 €	6	2	Kompakte Bauform, hohe Traglast bei gleichzeitiger Kostenminimierung
FR 2.1 Bestimmung der eigenen Position	Genauigkeit +/- 5 cm	DP 2.1a Entfernungsbild basierte Positionsbestimmung		8	2	
		DP 2.1b Laser 2D (2x), z.B. Sick S300	6 000 €	9	2	
FR 2.2 Finden und Abfahren von Wegen zwischen Start- und Zielpunkt	bis 1 km, 4 DOF	DP 2.2a Globale Bahnplanung unter kino-dynamischen Randbedingungen		8	2	
		DP 2.2b Bahninterpolator und -regler		8	2	
FR 2.3 Vermeidung dynamischer und statischer Hindernisse	bis 4 m/s ~ Geschw. Roboter	DP 2.3a Lokale Bahnanpassung unter kino-dynamischen Randbedingungen		6	1	Zeitnahe Reaktion / Bahnanpassung auf dynamische Hindernisse bei gleichzeitiger Beibehaltung der Bewegungsstabilität
		DP 2.3b Bahninterpolator und -regler	s. DP 2.2b	8	2	s. DP 2.2b
		DP 2.3c Entfernungsbild basierte Detektion & Verfolgung von Objekten		6	1	Zuverlässige Erkennung von Objekten (Hindernissen) unterschiedlicher Form und Größe mit einfacher Sensorik
		DP 2.3d CCD 3D mit geringer Auflösung (6x), z.B. von ifm	2 400 €	9	2	
FR 3.1 Schutz gegen Fehlbedienung	Insbesondere auch unabsichtliche Berührung der Steuerelemente durch aufgenommene Personen	DP 3.1 Steuerelemente an geeigneter Position		9	2	

>>



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE



Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 3.2 Arme und mobile Plattform entsprechend der Vorgaben des Pflegers bewegen	Geringer Kraftaufwand, kurze Reaktionszeiten (< 20 ms)	DP 3.2a Steuerknöpfe an den Armen, z.B. KMS 1-2 DOF	4 000 €	9	2	
		DP 3.2b Steuerungssoftware für Bedienelemente		8	2	
FR 4.1 Fahrwerk einfahren	Breite max. 50 cm, teilautomatisch	DP 4.1 Teilautomatische Kompaktierung der mobilen Basis		6	1	„Ausleger“ der mobilen Basis werden möglichst nah an den Rest der Plattform gebracht, Herausforderung: Stabilität erhalten, automatische Anpassung der Parameter für die Navigation
FR 4.2 Arme wegklappen	Sicherheit für Personal garantiert	DP 4.1 Klippmechanismus, um Arme nach oben zu klappen und zu arretieren		9	1	
FR 5.1.1 Personenlage erkennen	Lokalisierung: +/- 20 mm	DP 5.1.1a CCD 3D mit hoher Auflösung, z.B. SwissRanger von mesa	6 000 €	9	1	Nicht ausreichende Auflösung der Sensordaten (max. 200x200 px, Genauigkeit +/- 1 cm)
		DP 5.1.1b Software zur optischen Personenlagerkennung		4	1	Merkmale einer liegenden Person ggf. nicht eindeutig identifizierbar, wechselnde Lichtverhältnisse und Hintergründe, ggf. Verdeckung der Personen, Verletzungsgefahr bei Fehlerkennung
FR 5.1.2 Teilautonomes Bewegen der Arme	Positionierung: +/- 20 mm, Lifthöhe 50 – 120 cm, Gewicht 50 bis 200 kg	DP 5.1.2a 3-DOF Arme	50 000 €	6	2	Kompakte Integration der eingesetzten Armmodule; Zuverlässigkeit / Robustheit
		DP 5.1.2b Anpassung der Armbewegung entsprechend der erkannten Personenlage		6	1	Verletzungsgefahr bei fehlerhaften Bewegungen, Erkennung und Echtzeit-Update der Personenlage wird vorausgesetzt

>>



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 5.2.1 Netz straffen	Belastung bis 1 kN	DP 5.2.1a B Arme mit Auf-/Abwickelmechanismus für Netze	s. DP 5.2.1b	8	2	s. DP 5.2.1b
		DP 5.2.1b Software zur Ansteuerung von Armen und Wickelsystem für Netze		4	2	Koordination von Armbewegungen (lateral und Höhenverstellung) mit Auf-/Abwickelbewegung der Netze, dabei Gewährleistung der Stabilität und somit der Sicherheit des Patienten
FR 5.2.2 Mittleren Arm berührungslos am Benutzer vorbei führen		DP 5.2.2a Abstandssensorik auf dem Arm, z.B. 1-DOF Infrarot	1 000 €	9	1	
		DP 5.2.2b Software für abstandsbaasierte Armbewegung		7	1	
FR 5.2.3 Zweites Netz übergeben		DP 5.2.3 Übergabemechanismus für Netze	s. DP 5.2.1a	9	2	s. DP 5.2.1a

SR-Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 5.1.2 Teilautonomes Bewegen der Arme	Positionierung: +/- 20 mm	DP 5.2.1a 2-DOF Arme	9 000 €	3	2	Kompakte Antriebsmechanik mit ausreichender Traglast
		DP 5.1.2b Anpassung der Armbewegung entsprechend der erkannten Personenlage		4	1	Berücksichtigung der eingeschränkten Beweglichkeit der Achsen bei der Bewegungsplanung der Arme
FR 5.2.1 Netz straffen	Belastung bis 1 kN	DP 5.2.1a Arme mit Auf-/Abwickelmechanismus für Netze	s. DP 5.2.1b	3	2	s. DP 5.2.1b
		DP 5.2.1b Software zur Ansteuerung von Armen und Wickelsystem für Netze		2	2	Berücksichtigung der eingeschränkten Beweglichkeit der Achsen bei der Bewegungsplanung der Arme

Tab. 3-3.1 Komponentenübersicht



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Manuelle Alternative		
Grunddaten Use Case							
• Lebensdauer (a)		12		12		12	
• Anzahl Roboter (System)		1		1		-	
• Eff. Produktivzeit (h/a)		468		468		520	
• Badevorgänge (#/a)		1 123		1 123		1040	
• Entlastung (h/a)		78,0		78,0		-	
LCC-Summe (T€)		371,5	100%	284,6	100%	189,2	100%
• Investition		129,2	34,8%	75,9	26,7%	2,0	1,0%
• Installationskosten		20,0	5,4%	20,0	7,0%	-	-
• Aktivitätskosten		96,7	26,0%	95,2	33,5%	187,2	99,0%
• Wartung/Instandhaltung		125,5	33,8%	93,6	32,9%	-	-
• Andere		-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)		-275,4		-203,1		-108,3	
Softwarekosten (T€)		5 070,0		5 310,0		-	
Leistungskosten (€/Badevorgang)		27,56		21,12		15,16	
Produktivitätsgewinn (% , #/a)		20%, 187,2		20%, 187,2		-	

Tab. 3-3.2 LCC

Erläuterung zu Tab. 3-3.2: Im Folgenden werden die Berechnungen in Tab. 3-3.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird das System in einem Ein-Schicht-Modell bei 10h Schichtdauer einmal die Woche eingesetzt – zum Betrieb ist je Schicht eine Person notwendig. Jeder Badevorgang dauert 30 Minuten (20 Minuten Baden + 10 Minuten Vorbereitung). Es wird nur eine Station betrachtet. Pro Jahr können nominell 1 040 Badevorgänge durchgeführt werden. Die Verfügbarkeit des Systems wird mit 90% angesetzt (technischer Ausfall), so dass die effektive Produktivzeit 468 h/a beträgt (also 936 Badevorgänge/a). Der Serviceroboter-Einsatz entlastet das Personal dabei um 50% bei der Vorbereitung, was bei 936 Badevorgängen zu einer Gesamtentlastung von 78 h/a führt – der rechnerische Produktivitätsgewinn liegt daher bei 20% (also max. 1 123 Badevorgänge/a).

SR-Variante B: Keine Änderung.

Manuelle Alternative: 2 Pfleger pro Schicht. Einsatz von handelsüblichen Liftern (keine Produktivitätsgewinne/Entlastung), ansonsten keine Änderung.

Investition: Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der

Komponentenkosten (99,4 Tsd Euro pro Roboter) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators. **SR-Variante B:** Aufgrund der technisch geänderten Konfiguration ist die Summe der Komponentenkosten niedriger als in der SR-Variante A. Ansonsten keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Keine Kosten.

Installationskosten: Sowohl für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Systems bzw. Schulung wird jeweils ein externer Personalaufwand von 20 PT (160 Ph) bzw. 5 PT (40 Ph) angesetzt (100 Euro/Ph). Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen. **Manuelle Alternative:** Keine Kosten.

Aktivitätskosten: Die Personalkosten für das Pflegepersonal werden mit 15 Euro/h angesetzt (Mindestlohn + 50% Personalnebenkosten). Der Energieverbrauch beträgt 4 kW pro Roboter (1 872 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt. Es fallen keine weiteren Betreuungskosten des Systems an (Bedienung vergleichbar mit der manuellen Alternative).

SR-Variante B: Der Energieverbrauch beträgt 2 kW pro Roboter (936 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt. Ansonsten keine Änderung.

Manuelle Alternative: Die Personalkosten für das



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Pflegepersonal werden mit 15 Euro/h angesetzt (Mindestlohn +50% Personalnebenkosten). Es werden zwei Pfleger benötigt.

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von 100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

Manuelle Alternative: Keine Kosten.

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik (*s. Kap. 2.3.1.2*) 5 070 Tsd Euro für SR-Variante A und 5 310 Tsd Euro für SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

Bei diesem Serviceroboter-Anwendungsfall handelt es sich nicht um eine 100%ige Automatisierungslösung im Vergleich zur manuellen Alternative, sondern im Wesentlichen um eine Unterstützungsaufgabe. Da das Personal bei seiner Haupttätigkeit unterstützt wird, ist Entlastung voll produktivitätswirksam. Es wird davon ausgegangen, dass das System vollausgelastet ist.

Kostenstruktur: In keiner der SR-Varianten (A/B) gibt es einen dominierenden Kostenblock aus Sicht der Lebenszykluskosten – allerdings ist anzumerken, dass in SR-Variante B die Investitionsaufwendungen inklusive der Installationskosten das geringste Gewicht haben, während sich das Verhältnis in SR-Variante A genau umgekehrt darstellt. Auf Grundlage der Kostenstruktur könnten Skaleneffekte im Bereich der Komponentenkosten des Serviceroboters einen Hebel zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit darstellen.

Wirtschaftlichkeit: Keine der SR-Varianten ist gegenüber der manuellen Alternative günstiger (Leistungskosten von 27,56 bzw. 21,12 vs. 15,16 Euro/Badevorgang). Das gleiche gilt auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF (-275,4 bzw. -203,1 vs. -108,3 Tsd Euro).⁹ Bzgl. der

laufenden Kosten ist allenfalls SR-Variante B im Vergleich zur manuellen Alternative mit 188,8 vs. 187,2 Tsd Euro vergleichbar.

Sensitivität: Aufgrund der Kostenstruktur kommen als relevante Parameter für eine Sensitivitätsanalyse die Volllastannahme, die Verfügbarkeit des Systems, seine Anschaffungskosten sowie die Lohnkosten in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Varianten ähnlich und proportional oder sind im Vergleich zu dem Gewicht bzgl. der Aktivitätskosten irrelevant).¹⁰

- Geht man davon aus, dass die rechnerischen Produktivitätssteigerungspotenziale nicht gehoben werden (beispielsweise um das Personal zu entlasten), so erhöhen sich bei 1 040 Badevorgängen die Leistungskosten in der SR-Varianten A/B auf 33,07/22,82 Euro/Badevorgang.
- Geht man davon aus, dass der Serviceroboter zu einer 100%-Entlastung führt, so führt das zwar zu einer Produktivitätssteigerung von 50% (1 404 Badevorgänge/a), die Leistungskosten würden aber immer noch bei 22,05 bzw. 16,89 Euro/Badevorgang liegen.
- Im Falle einer Verfügbarkeit von 100% und unter der Volllastannahme (1 248 Badevorgänge/a) sinken die Leistungskosten nur auf 24,83 bzw. 19,02 Euro/Badevorgang.
- Bei Lohnkostensteigerungen von 15 auf 22,5 und auf 30 Euro/h erhöhen sich die Leistungskosten in den SR-Varianten auf 31,03 und 34,51 bzw. 24,59 auf 28,06 Euro/Badevorgang – in der manuellen Alternative auf 22,66 und 30,16 Euro/Badevorgang. Somit wäre nur SR-Variante B im Falle einer Verdopplung der Lohnkosten wirtschaftlicher als die manuelle Alternative.

3.2 Nutzwert

- Reduktion der zeitlichen und körperlichen Belastung der Pflegekräfte, dadurch Steigerung der Attraktivität der Arbeitsplätze, Reduktion der Krankheitsfälle
- Steigerung der Pflegequalität, da mehr Zeit für soziale Interaktion bleibt, das Pflegepersonal weniger gestresst wird und sich damit die Lebensqualität der Bewohner erhöht.

⁹ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

¹⁰ Die Reduzierung der Investitionsaufwendung ist prinzipiell schon durch SR-Variante B im Vergleich zur SR-Variante A abgebildet.



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Gesundheit“

Die Gesundheitsausgaben sind seit 1995 kontinuierlich gestiegen und betragen im Jahr 2006 245,0 Mrd Euro (vgl. Tab. 3-3.3).¹¹ Hauptkostentreiber dieser Entwicklung sind neben dem aufgrund der demografischen Entwicklung gestiegenen Leistungsvolumen insbesondere auch Qualitätsverbesserungen sowie die Preisentwicklung der Gesundheitsdienstleistungen. Die überproportionalen Ausgabenzuwächse werden dabei nur teilweise auf den technologischen Fortschritt zurückgeführt – in einigen Leistungsbereichen wie der Arzneimittelversorgung werden als Gründe dafür auch ausdrücklich fehlende Wirtschaftlichkeitsanreize verantwortlich gemacht. Als weiteres prägendes Element der Gesundheitsausgaben wird die intensive Gesetzgebung angeführt – gerade in Hinsicht auf die gesetzliche Kranken- und Pflegeversicherung.

Etwa die Hälfte der Gesamtkosten entfallen auf ärztliche und pflegerisch/therapeutische Leistungen (66,4 bzw. 58,8 Mrd Euro) – der Anteil der Investitionen an den Gesamtausgaben beträgt ca. 3,7% (9,0 Mrd Euro). Aus Sicht der Einrichtungen entfallen die meisten Ausgaben auf den

Krankenhausbereich (63,9 Mrd Euro) – der Bereich Pflege folgt mit 18,8 Mrd Euro erst an vierter Stelle.

Mit 139,8 Mrd Euro wird der Großteil der Kosten durch die gesetzliche Krankenversicherung getragen, gefolgt von privaten Haushalten/Organisationen (33,3 Mrd Euro), den privaten Krankenversicherungen (22,5 Mrd Euro) und der sozialen Pflegeversicherung (18,1 Mrd Euro) – der Rest verteilt sich auf die öffentlichen Haushalte, Arbeitgeber sowie die gesetzlichen Unfall- und Rentenversicherungsträger. Mit etwa 4,2 Millionen Beschäftigten findet sich etwa jeder 9te Arbeitsplatz in Deutschland im Gesundheitswesen (zum Vergleich: Automobilbau nur etwa jeder 50te). In vielen Bereichen wird über einen Arbeitskräftemangel geklagt, der sich in Zukunft noch verstärken wird.

Leistungsarten	1995	2000	2005	2006
Prävention / Leistungsschutz	7,5	7,5	8,9	9,3
Ärztliche Leistungen	51,7	57,5	64,4	66,4
Pflegerische/therapeutische Leistungen	43,7	52,3	57,5	58,8
Unterkunft / Verpflegung	16,0	16,5	17,7	18,5
Waren	47,8	55,7	64,5	65,8
davon:				
• Arzneimittel	26,4	31,6	39,4	39,6
• Hilfsmittel	8,8	10,4	10,5	10,9
• Zahnersatz (nur Material- und Laborkosten)	5,5	5,4	5,1	5,5
• sonstiger medizinischer Bedarf	7,2	8,2	9,5	9,8
Transporte	2,8	3,4	4,0	4,0
Verwaltungsleistungen	9,9	11,3	13,1	13,1
Investitionen	7,2	8,3	9,2	9,0
Gesamt	186,5	212,4	239,3	245,0

Tab. 3-3.3 Kostenstruktur der Gesundheitsausgaben nach Leistungsarten in Mrd Euro.¹²

¹¹ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden aus Robert-Koch-Institut (2006): Gesundheitsberichterstattung des Bundes. Gesundheit in Deutschland. Zusammenfassung. (www.qbe-bund.de)

¹² Gesundheitsberichterstattung des Bundes (2010) (www.qbe-bund.de)



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 4 MARKTDATEN

Einrichtungen	1995	2000	2005	2006
Gesundheitsschutz	1,8	1,8	1,9	1,9
Ambulante Einrichtungen	87,0	100,8	115,3	118,6
davon:				
• Arztpraxen	27,0	30,8	35,1	36,4
• Zahnarztpraxen	14,0	14,7	15,2	15,8
• Praxen sonstiger medizinischer Berufe	4,8	5,8	7,0	7,1
• Apotheken	23,6	28,2	34,7	34,7
• Gesundheitshandwerk/-einzelhandel	12,5	14,1	14,7	15,5
• ambulante Pflege	3,9	5,8	7,1	7,4
• sonstige Einrichtungen	1,1	1,3	1,6	1,6
Stationäre/teilstationäre Einrichtungen	70,9	78,8	87,5	90,1
davon:				
• Krankenhäuser	51,1	56,4	62,1	63,9
• Vorsorge-/Rehabilitationseinrichtungen	7,6	7,5	7,3	7,4
• stationäre/teilstationäre Pflege	12,2	14,9	18,1	18,8
Rettungsdienste	1,7	2,1	2,6	2,6
Verwaltung	11,0	12,7	14,6	14,5
Sonstige Einrichtungen und private Haushalte	6,3	7,4	7,3	7,3
Ausland	0,6	0,6	0,9	1,0
Investitionen	7,2	8,3	9,2	9,0
Gesamt	186,5	212,4	239,3	245,0

Tab. 3-3.4 Kostenstruktur der Gesundheitsausgaben nach Einrichtungen in Mrd Euro.¹³

Lage:

Wie Modellrechnungen des Statistischen Bundesamtes (Destatis) zeigen¹⁴, kann der absehbare demografische Wandel in Deutschland zu etwa 58% mehr Pflegebedürftigen und 12% mehr Krankenhausbehandlungen im Jahr 2030 im Vergleich zu heute führen. Die Zahl der Pflegebedürftigen dürfte von 2,1 Millionen auf 3,4 Millionen und die in Krankenhäusern behandelten Fälle von 17 auf 19 Millionen steigen.

Ursache für diese Zunahmen ist die steigende Zahl an Älteren bei insgesamt sinkender Gesamtbevölkerung. Nach den Ergebnissen der aktuellen Bevölkerungsvorausberechnung wird die Zahl der 60-Jährigen und Älteren bis 2030 um rund 38% von

20,5 Millionen auf voraussichtlich 28,4 Millionen Einwohner und die der über 80-Jährigen vermutlich sogar um 73% von 3,6 Millionen auf 6,3 Millionen ansteigen.

Die veränderte Bevölkerungsstruktur dürfte zukünftig zu einem deutlich höheren Anteil älterer Pflegebedürftiger führen: Während heute 53% der Pflegebedürftigen 80 Jahre und älter sind, könnten es im Jahr 2030 rund 65% sein. Die Zahl der Pflegebedürftigen in diesem Alter nimmt dabei von 1,1 Millionen auf etwa 2,2 Millionen im Jahr 2030 zu. In der hier zugrundeliegenden Basisvariante der Modellrechnung ist unterstellt, dass die altersspezifischen Pflegequoten im Jahr 2030 identisch mit denen von heute sind. Geht man hingegen davon aus, dass sich das Pflegerisiko entsprechend der steigenden Lebenserwartung in ein höheres Alter verschiebt, läge die Zahl der ab 80-jährigen Pflegebedürftigen bei 2,0 Millionen. Die Gesamtzahl der Pflegebedürftigen würde in diesem Modell etwas weniger stark auf 3,0 Millionen im Jahr 2030 ansteigen (Basisvariante: 3,4 Millionen).

Investitionsverhalten:

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen zum Investitionsverhalten im Gesundheitsbereich festhalten:

- Aufgrund der demografischen Entwicklung wird mit einem weiteren Anstieg des Leistungsvolumens zu rechnen sein, der tendenziell schneller anwachsen wird als die Mittel zu seiner Finanzierung.
- Entscheidendes Element bei der Bewertung von Investitionsvorhaben wird vor allem ihre Wirtschaftlichkeit sein. Aufgrund des engen finanzwirtschaftlichen Rahmens werden auch die Finanzierungsmöglichkeiten eine wesentliche Rolle spielen – hier wird davon ausgegangen, dass sich diese bei privaten Trägern besser darstellt als bei gesetzlichen.
- Qualitative Faktoren spielen zwar eine Rolle, werden jedoch erst relevant, wenn die absolute Wirtschaftlichkeit der Investition sichergestellt ist. Eine Ausnahme könnten Investitionsprojekte darstellen, die dazu beitragen, dem Arbeitskräftemangel zu begegnen – entweder dadurch, dass sie bei vorhandenen Tätigkeiten entlasten oder diese komplett übernehmen.

¹³ Gesundheitsberichtserstattung des Bundes (2010) (www.gbe-bund.de)

¹⁴ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden Statistisches Bundesamt (2007): Pflegestatistik 2007. (www.destatis.de)



BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 4 MARKTDATEN

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Stationäre Pflege“

Tab.3-3.5 ergänzt die obigen Marktstrukturdaten spezifisch mit Daten aus dem Bereich „Stationäre Pflege“.

Betriebe (Anzahl) und Plätze (Anzahl)	11 029	799 059
davon Private Träger	4 322	275 257
davon Freigemeinnützige Träger	6 072	469 574
davon Öffentliche Träger	635	469 574
davon 1- 60 Plätze	5 880	
davon 61 - 200 Plätze	5 023	
davon 201 und mehr Plätze	126	
Pflegebedürftige	709 311	
Pflegestufe I	253 406	
Pflegestufe II	299 936	
Pflegestufe III	145 136	
ohne Zuordnung	10 833	
Beschäftigte	573 545	
davon Vollzeit	202 764	
davon Teilzeit (inkl. geringfügig beschäftigte)	327 992	
davon Zivildienstleistende/Azubis/etc	42 789	

Tab. 3-3.5 Strukturdaten „Stationäre Pflege“ 2007¹⁵

Bundesweit gab es im Dezember 2007 rund 11 000 nach SGB XI zugelassene voll- bzw. teilstationäre Pflegeheime.¹⁶

Die Mehrzahl der Heime (55% bzw. 6 100) befand sich in freigemeinnütziger Trägerschaft (z. B. DIAKONIE oder CARITAS); der Anteil der privaten betrug 39% – er liegt somit niedriger als im ambulanten Bereich. Öffentliche Träger haben, wie im ambulanten Bereich, den geringsten Anteil (6%). Bei jedem fünften Heim (20%) war neben dem Pflegebereich auch ein Altenheim oder Betreutes Wohnen organisatorisch angeschlossen. Dort werden hauptsächlich ältere Menschen betreut, die keine Leis-

¹⁵ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden aktuelle Daten aus der Gesundheitsberichtserstattung des Bundes (www.gbe-bund.de)

¹⁶ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden Statistisches Bundesamt (2007): Pflegestatistik 2007. (www.destatis.de)

tungen aus der Pflegeversicherung erhalten. Im Schnitt betreute ein Pflegeheim 64 Pflegebedürftige; auch hier im stationären Bereich betreiben die privaten Träger eher kleine Einrichtungen: Im Mittel wurden in den privaten Heimen 54 Pflegebedürftige betreut; hingegen bei den freigemeinnützigen 71 Pflegebedürftige und den öffentlichen Heimen 77. In den Heimen waren 2007 insgesamt 574 000 Personen beschäftigt. (Dies entspricht bei einer Gewichtung nach der jeweiligen Arbeitszeit ungefähr 421 000 Vollzeitäquivalenten). Die Mehrzahl (85%) der beschäftigten Personen war weiblich. Die meisten Beschäftigten hatten ihren Arbeitsschwerpunkt im Bereich Pflege und Betreuung; 69% der Beschäftigten wurden hier eingesetzt.

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Servicroboter-Anwendungsfall im Bereich Pflege bezieht sich ausschließlich auf den Einsatz in Pflegeheimen (stationäre Pflege). Aus diesem Grund wird auf Basis der Daten der Gesundheitsberichtserstattung des Bundes der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-3.6):¹⁷

- Statistisch relevanter Sektor ist die „Pflege im Rahmen der Pflegeversicherung“, Bereich „Pflegeheime“.

Es wird angenommen, dass nur Pflegeheime ab einer bestimmten Größe in der Lage sind, die entsprechenden Investitionen zu tätigen. Als Grenze werden hier Pflegeheime mit 200 und mehr Plätzen gesehen.¹⁸

¹⁷ Gesundheitsberichtserstattung des Bundes (www.gbe-bund.de). Datenbezug: 2007.

¹⁸ Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit durch die Pflegeheime. Bei durchschnittlichen Investitionen von ~1 000 pro Pflegeplatz (Schätzung siehe Abschnitt) stehen Betrieben mit 200 und mehr Plätzen von >100 000 Euro zur Verfügung – es wird davon ausgegangen, dass erst ab dieser Größenordnung genügend Mittel für SR-Investitionen übrig bleiben.



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 4 MARKTDATEN

Pflegeheime insgesamt	11 029
davon mit mehr als 200 Plätzen	126

Tab. 3-3.6 Ableitung des relevanten Zielmarkts¹⁹

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 126 Pflegebetriebe als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-3.7):

Relevante Betriebe	~126
Brutto Investitionssumme (T€)	~29 690,7
davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~2 969,1
davon SR Potenzial (T€)	~742,3

Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR Systempreis T€ 129,2; 1 SR pro System)	
Errechnet	~6
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~0

Errechneter max. Bestand an SR (12 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
Errechnet	~72
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~0

Tab. 3-3.7 Ableitung des Marktpotenzials (eigene Schätzungen)

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme ist nicht direkt verfügbar. Aus den Daten des Gesundheitsberichts des Bundes geht jedoch hervor, dass 2006 ~ 9,0 Mrd Euro in Gebäude und Anlagen investiert wurden. Auf dieser Grundlage kann abgeschätzt werden, dass auf die Betriebe der stationären Pflege ~716,9 Mio Euro entfielen.²⁰
- Als Bezugsgröße zur Abschätzung der Investitionen je Pflegeheim eignen sich die verfügbaren Plätze. Bei 799 059 verfügbaren Plätzen ergibt sich demnach eine Investition von

¹⁹ Statistisches Bundesamt (2008)

²⁰ Schätzung basierend auf der Annahme, dass sich die Investitionen proportional zu den Ausgaben verhalten. Diese betragen 2006 im Bereich der stationären Pflege 18,8 Mrd Euro bei 236 Mrd Euro Gesamtausgaben im Gesundheitssystem (vgl. Tab. 3-3.4; ohne Investitionsanteil).

~897 Euro/Platz. Bei einer geschätzten Anzahl von ~33 100 Pflegeplätzen ergibt sich eine Bruttoinvestitionssumme von ~29,7 Mio Euro in Pflegeheimen mit mehr als 200 Plätzen.²¹

- Es wird geschätzt, dass etwa 10% dieser Summe in technische Ausrüstungen und Anlagen investiert werden (~2,97 Mio Euro).²² Weiterhin wird geschätzt, dass davon wiederum 25% für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen könnten (~742 Tsd Euro).²³
- Bei einem Systempreis von Tsd Euro 129,2 (SR-Variante A) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~6 Serviceroboter-Systemen führen – was letztlich zu einer Installed Base von 72 Servicerobotern im "eingeschwungenen" Marktzustand führen würde (Lebensdauer 12 Jahre).
- Diese Werte sind allerdings nur als obere Grenzen für das Marktpotenzial zu sehen – ihr Erreichen setzt eine nach den Maßstäben der Branche positive Wirtschaftlichkeitsbetrachtung voraus. Aufgrund der negativen LCC-Betrachtung der hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsfelder (vgl. Abschnitt 3.1) kann das hier errechnete Marktpotenzial nur langfristig und unter der Voraussetzung weiterer Kostenoptimierungen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

²¹ In Ermangelung geeigneter Daten der Pflegeplätze nach Pflegeheim-Größenklassen ist auch die Gesamtzahl der Pflegeplätze in Heimen mit mehr als 200 Plätzen zu schätzen: Die Statistiken unterscheiden im relevanten Größenbereich nur zwischen Pflegeheimen mit 201 – 300 Plätzen (110 Betriebe) sowie mit 301 und mehr (16 Betriebe). Daraus ergibt sich eine Schätzung von 250 Plätze * 110 Betriebe + 350 Plätze * 16 Betriebe = 33 100 Plätze.

²² Ermangelung geeigneter Daten. Da angenommen wird, dass der Großteil der Investitionen in Gebäude bzw. gebäudespezifische Ausrüstungen investiert wird, werden die technischen Ausrüstungen auf einem niedrigen Niveau angesetzt.

²³ Ermangelung geeigneter Daten. Da jedoch die SR-Lösungen bestehende Geräte ersetzen und damit keine zusätzlichen Bedarfe auslösen, wird ein hoher Anteil angesetzt.



01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Aufgrund des hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsszenarios kann keine der SR-Varianten günstiger sein als die manuelle Erbringung.
- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass keine der SR-Varianten aus wirtschaftlicher Sicht eine Alternative zur manuellen Erbringung darstellen könnte – dafür reichen die bei den betrachteten Lösungen maximal zu erwartenden Produktivitätspotenziale (20%) nicht aus. Berücksichtigt man zusätzlich, dass die laufenden Kosten der SR-Varianten ebenfalls über denen der manuellen Alternative liegen, dann folgt daraus, dass die SR-Varianten nur im Falle von Lohnkostensteigerung hinsichtlich der Prozesskosten eine Chance haben, unter die der manuellen Erbringung zu fallen. Die Sensitivitätsanalyse hat hier gezeigt, dass dies erst bei einer Verdopplung der Lohnkosten und dann auch nur für SR-Variante B der Fall sein wird.
- Bei dieser Einschätzung ist allerdings zu beachten, dass die Anlage durch eine Station allein nicht ausgelastet werden kann (nur ein Washtag pro Woche). Wenn dies geändert werden kann – z.B. dadurch dass sich mehrere Stationen einen Serviceroboter teilen, dann verbessert sich die Wirtschaftlichkeit erheblich.
- Gerade im Bereich Pflege ist die Investition in Serviceroboter aufgrund der sich „verschlechternden“ Rahmenbedingungen aber auch aus einem anderen Blickwinkel zu bewerten: Auf der einen Seite wird der demografische Wandel zu einer weiteren Erhöhung des Leistungsbedarfs führen, auf der anderen Seite ist mit einer Verschärfung des Fachkräftemangels zu rechnen. Will man weiterhin die Leistungsbereitschaft sicherstellen, sind weitere Produktivitätssteigerungen notwendig. Diese können wie gezeigt durch den Serviceoboter-Einsatz erreicht werden. Die Frage ist hier lediglich, zu welchen zusätzlichen Kosten dies erfolgen kann. Hier könnte gerade die SR-Variante B einen gangbaren Weg darstellen, weil diese mit den geringsten Kostensteigerungen je zusätzlicher Leistungseinheit einhergeht.
- Vor diesem Hintergrund könnten sich zwar hohe Marktpoten-

- ziale ergeben, allerdings nur unter den Voraussetzungen, dass
 - die Serviceoboter aufgrund des Fachkräftemangels bei gleichzeitig zunehmenden Leistungsvolumen die einzige Möglichkeit für Produktivitätsgewinne darstellen,
 - die Zusatzkosten auf die Träger des Gesundheitssystems umgelegt werden können,
 - die Finanzierungsfähigkeit durch die Träger der Pflegeheime gegeben ist – dies könnte sich gerade für öffentliche, kommunale Trägergesellschaften als schwierig herausstellen.
- Aufgrund der noch fehlenden Wirtschaftlichkeit der Serviceoboter-Lösungen wird daher mittelfristig mit keiner nennenswerten Ausschöpfung der errechneten Marktpotenziale gerechnet – langfristige Potenziale ergeben sich nur im Falle weiterer und signifikanter Verbesserungen der Wirtschaftlichkeit. Dies schließt jedoch nicht eine auch schon heute wirtschaftliche Nutzung in spezifischen Einzelfällen aus.
- Aufgrund des zu erwartenden Fachkräftemangels könnte allerdings für die Einschätzung des tatsächlich zu erreichenden Marktpotenzials auch die Tatsache eine Rolle spielen, dass die Serviceroboter-Lösung nur einen Mitarbeiter benötigt, während in der manuellen Variante zur gleichen Zeit zwei Mitarbeiter mit dieser Tätigkeit gebunden sind. Zudem sind bei dieser Serviceroboter-Lösung unbedingt die qualitativen Nutzensvorteile (z.B. Personalentlastung, Dokumentation) zu berücksichtigen. Beide Aspekte könnten daher im Einzelfall dennoch zu einer positiven Investitionsentscheidung führen.

5.2 Forschungsbedarf

Erheblicher Forschungsbedarf besteht für dieses Anwendungsszenario in der Personenlageerkennung und entsprechenden Anpassung der Armbewegungen. Herausforderungen sind insbesondere:

- Erkennung der Merkmale einer liegenden Person und Aktualisierung in Echtzeit
- Robuste und zuverlässige Erkennung auch bei wechselnden Lichtverhältnissen, ständig wechselnden Hintergründen und teilweiser Verdeckung der Objekte. Dabei handelt es sich um eine sicherheitstechnisch kritische Funktion, da Fehler direkt





01

02



03

04

05

06

07

08

09

10

11

BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 5 FAZIT

in einer Verletzung des Patienten resultieren.

- Als weiterer Schwerpunkt wird die Ansteuerung der Arme und des Netz-Wickelsystems gesehen, die präzise aufeinander abgestimmt und geregelt werden müssen. Dabei stehen jedoch im Gegensatz zur Personenlageerkennung eher Engineering-Aspekte im Vordergrund, die technische Herausforderung ist eher gering. Allerdings ist auch diese Komponente sicherheitsrelevant, da über die Arme und Netze die Stabilität und somit die schmerzfreie und problemlose Lage der Patienten sichergestellt wird.
- Ein weiterer Forschungsbedarf, der in diesem Szenario fast eine noch höhere Bedeutung als die Software hat, liegt in der Entwicklung leichter, kostengünstiger, aber dennoch ausreichend kräftiger Armmodule für das Aufnahme- und Transportsystem. Im Zweifelsfall müssen Personen von bis zu 200 kg gehoben und bewegt werden.





BEWEGEN VON PERSONEN IN DER PFLEGE

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B
Omnidirektionales Antriebssystem sowie Steuerelektronik und Stromversorgung	30 000 €	30 000 €
6x O2DIRPKG/K von ifm electronics	2 400 €	2 400 €
2x Sick S300	6 000 €	6 000 €
Aufnahme- und Transportsystem	50 000 €	9 000 €
1x SwissRanger von mesa	6 000 €	6 000 €
1D Abstandssensor am mittleren Arm	1 000 €	1 000 €
Bedienelemente 2x KMS 2 DOF	4 000 €	4 000 €

Tab. 3-3.8 Anschaffungskosten



SZENARIOSTECKBRIEF

BODENFRÜCHTEERNT



04



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

In diesem Steckbrief umfasst Gartenbau den Obst-, Gemüse- und Zierpflanzenanbau sowohl in Gewächshäusern als auch im Freiland. Getreideanbau wird nicht betrachtet, da auf der einen Seite durch den Einsatz von Großmaschinen bereits ein hoher Automatisierungsgrad besteht und auf der anderen Seite der Ertrag pro Frucht zu gering für den wirtschaftlichen Einsatz von Servicerobotern scheint. Diese Einteilung basiert auf Empfehlungen zweier Informationsgespräche. Nachfolgend ist exemplarisch die derzeitige Durchführung eines Erntevorgangs von Bodenfrüchten sowohl als Anwendungsfalldiagramm (Abb. 3-4.1) als auch sequenziell (Abb. 3-4.2) dargestellt:

- 12 Meter breiter Erntebalken
- 28 Personen benötigt (12 Ernter, 12 Klassifizierer, 3 Verpacker, 1 Gruppenleiter)

Eine typische Erntemaschine im Einsatz ist in Abb. 3-4.3 abgebildet.

1.2 Probleme

Bei der Ernte von Bodenfrüchten bestehen folgende Probleme:

- Moderne Landmaschinen und einfache Automatisierungssysteme sind nicht von jedem bedienbar.
- Anstrengende körperliche Arbeit
- Unnötiges, häufiges Anfassen der Früchte reduziert die Qualität.
- Erkennung reifer Früchte nicht automatisiert, bleibt also eine rein manuelle Tätigkeit (z.B. „Gurkenflieger“).
- Ernteoptimierungsverfahren (z.B. Netzfolien ausbringen) sind nur bei einigen Früchten oder speziellen Züchtungen einsetzbar und bedeuten hohen Materialaufwand.
- Hohe Anzahl an Hilfskräften bedeutet hohen Organisationsaufwand.

Beim Anbau gibt es laut Experten noch folgende Probleme:

- Bewässerungsbedarf kann nicht zuverlässig festgestellt werden, wird nach Augenmaß behoben.
- Einsatz von Dünger und Pflanzenschutz ist oft noch ineffizient.

Manuelle Ernte

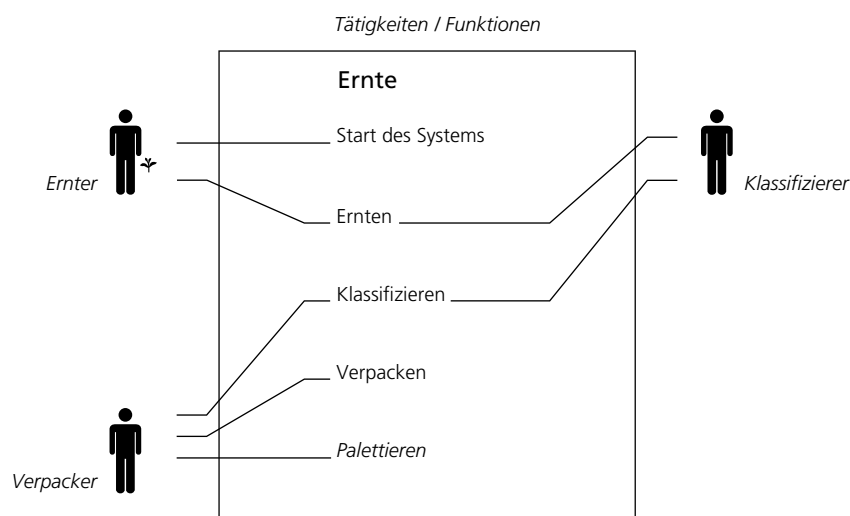


Abb. 3-4.1 Anwendungsfalldiagramm manuelle Ernte von Feldfrüchten





BODENFRÜCHTEERNT

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



Sequenzdiagramm

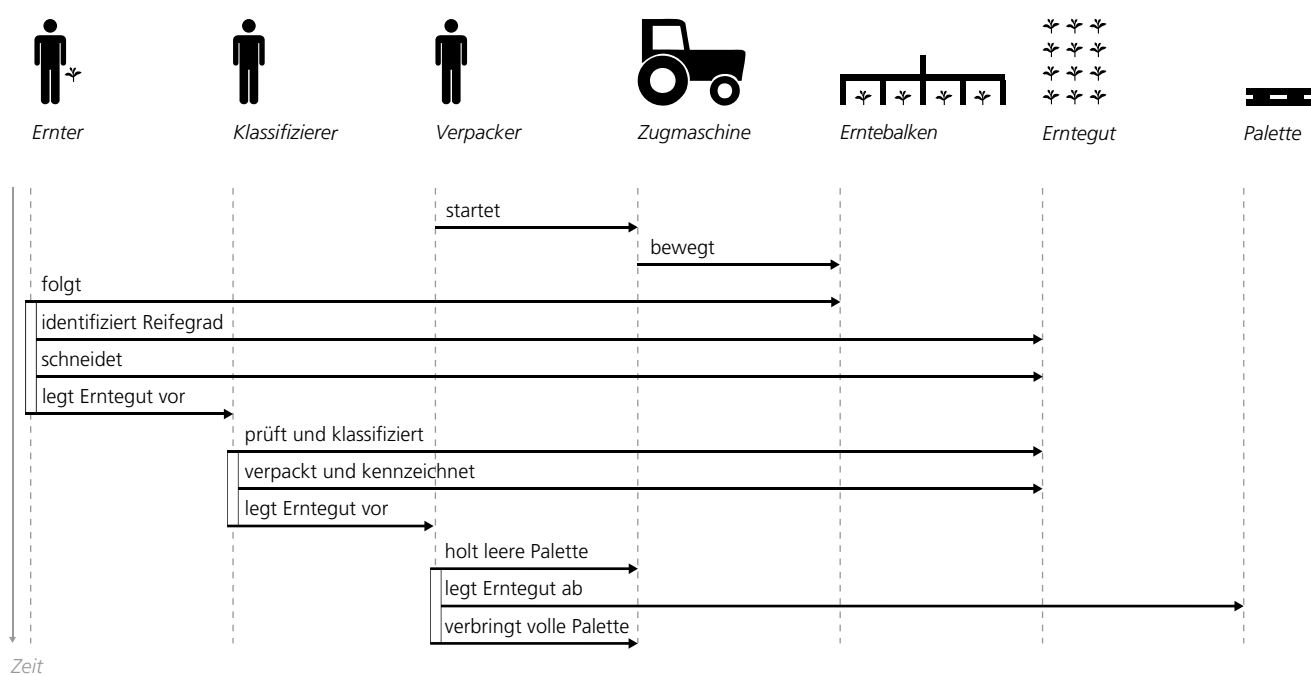


Abb. 3-4.2 Sequenzdiagramm des aktuellen Erntevorgangs von Bodenfrüchten

Erntemaschine



Abb. 3-4.3 Erntemaschine im Einsatz (Quelle: Behr AG)



BODENFRÜCHTEERNT

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Bei Ernte von Bodenfrüchten:

- Assistenzfunktionen können Bedienung von Maschinen erleichtern.
- Beschickungsroboter für Pflanzmaschinen kann eine Person pro Meter Maschinenbreite einsparen.
- Eine sensorgestützte, automatisierte Nachkontrolle der Pflanzergebnisse führt ebenfalls zu einer Einsparung von einer Person pro Meter.
- Roboter für die Ernte reduziert die Anzahl an Berührungen der Frucht, da zwischen Ernten, Klassifizieren und Verpacken nicht umgegriffen wird, daraus folgt eine Qualitätssteigerung.

Bei Anbau und Pflege gibt es folgende Potenziale:

- Kleines mobiles System für die Pflege kann Pflanzen- und Bodenirritationen vermeiden.
- Qualitätssteigerung der Informationen über Boden und Pflanzen
- Einsparung der benötigten Mittel (Dünger, Pestizide, Herbizide, Fungizide)
- Durch Vielseitigkeit der Kinematiken erhöht sich die Auslastung bei saisonalen Arbeiten (gleicher Roboter für Setzen, Pflanzen, Pflege und Ernten; unterschiedliche Software).

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

- Hoher Anteil manueller Arbeit z.B. durch unterschiedliche Reifegrade und Formen der Früchte
- Bei 2% der Landwirtschaftsfläche macht der Gartenbau 40% der gesamten landwirtschaftlichen Wertschöpfung in Deutschland aus. (Expertenaussage)
- Hoher Preisdruck in Deutschland durch erzwungene Überproduktion (Expertenaussage)
- Löhne und Logistikkosten sind die größten Kostenverursacher. (Expertenaussage)

- Die Aufgaben sind von der jeweiligen Saison abhängig.
- Hoher Anteil an Saisonarbeitern (ca. 256 000 im Jahr 2008¹ von 4,46 Euro/h bis 6,39 Euro/h²)
- Anteil von Sozialversicherungsnehmern fast doppelt so hoch wie im Ackerbau (230 000 vs. 130 000 in 2009³)
- Durch staatliche Interventionen sollen verstärkt deutsche Arbeitskräfte die ausländischen Arbeitskräfte ersetzen (jährlich ca. 10%⁴)
- 19% der Arbeitsunfähigkeitstage resultieren aus Verletzungen, 25% aus Skelett- und Muskelschäden.⁵

1.4.2 Einsatzbereich

Die Aufgaben im Gartenbau umfassen grob die folgenden drei Bereiche:

- Pflanzen bzw. Aussäen
 - Löcher oder Furchen für Saatgut, Setz- oder Stecklinge (Tiefe 5 – 90 mm bei Saatgut, 30 – 150 mm bei Setzlingen)
 - Handling des Saatguts (im Millimeter- bzw. Submillimeterbereich)
 - Handling der Setzlinge (Zentimeterbereich)
 - Ggf. Nachbereitung des Bodens (Wasser und Dünger)
- Pflegen
 - Düngung
 - Mechanische oder chemische Unkrautbekämpfung
 - Prüfen auf Pilz- und Schädlingsbefall sowie ggf. chemische Bekämpfung
 - Prüfung des Wachstumsfortschrittes
 - Prüfung des Reifegrades

¹ Quelle: Migrationsbericht des BMI von 2008

² Quelle: www.agri-info.eu

³ Quelle: www.agri-info.eu

⁴ Quelle: www.agri-info.eu

⁵ Quelle: Unfallstatistik <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/0,1518,705576,00.html>





01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

- Ernten
 - Identifikation reifer Früchte
 - Freilegen und Separieren der Frucht von der Pflanze (Schneiden, Pflücken, Stechen)
 - Ggf. Putzen und Reinigen der Frucht (überstehende Blätter entfernen, Erde abwaschen)
 - Sofern möglich Klassifizierung der Frucht (Gewicht, Größe, Farbe identifizieren) sowie direktes Verpacken (meist Folienverpackung mit Kennzeichnung)

Weiterhin gilt:

- Beim eingesetzten Personal handelt es sich häufig um Arbeitskräfte mit keiner oder nur rudimentärer Ausbildung. Jegliches Werkzeug muss somit einfach zu handhaben sein. Zukünftige Automatisierungstechnik muss mit einfachen Benutzerschnittstellen auskommen und Fehlbedienung abfangen.
- Bei den zu handhabenden Produkten handelt es sich teilweise um biegeschlafe und berührungsempfindliche Pflanzen oder Früchte. Beschädigung während der Handhabung kann zu Qualitätsverlust und sogar zu Ernteausfall führen. Somit ist die Menge der Handhabungen gering zu halten (z.B. Verpacken direkt nach der Ernte auf dem Feld bzw. im Gewächshaus).





01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Ein Ernteroboter übernimmt die Aufgaben des Ernte- und Klassifizierungspersonals. Anbei ist die Sequenz der Ernte mit einem Roboter dargestellt (Abb. 3-4.4).

- Roboterarm läuft auf einer Linearachse am Erntebalken.
- Sensor identifiziert Frucht und Reifegrad.
- Roboterarm befreit, greift und erntet Frucht (Vorgänge fruchtabhängig).
- Sensor qualifiziert Frucht (Gewicht, Farbe, Festigkeit, ...).
- Roboterarm verbringt Frucht in Verpackungseinheit.
- Verpackungseinheit verpackt und beschriftet Frucht.
- Roboterarm verbringt verpackte Frucht in Palette.

2.2 Roboterentwurf

Der Ernteroboter wird als Erweiterung für bestehende Erntemaschinen konzipiert. Hierbei handelt es sich um eine exemplarische Entwicklung für die Salaternte. Ziel ist es, die benötigte Anzahl von Personen von 28 auf 3 zu reduzieren. Direkt am Ende der Erntemaschine wird eine Linearachse vorgesehen, auf der mehrere Roboterarme beweglich angebracht sind. Die genaue Anzahl hängt von der gewünschten Bearbeitungsgeschwindigkeit ab und wird später betrachtet, liegt jedoch maximal bei der Anzahl der Ernter in der manuellen Variante. Jeder Roboterarm ist mit einem Endeffektor ausgestattet, der in der Lage ist, die zu erntende Frucht freizulegen, zu greifen und zu ernten. Dabei wird Wert auf möglichst schonenden Kontakt zur Frucht gelegt, um die Qualität zu erhalten. Aus diesem Grund sind im ersten Entwurf des Roboters Drucksensoren in den Endeffektoren vorhanden.

Ernteroboter



Ernteroboter



Verpackungseinheit
1 kg



Bediener



Zugmaschine



Erntebalken



Erntegut



Palette

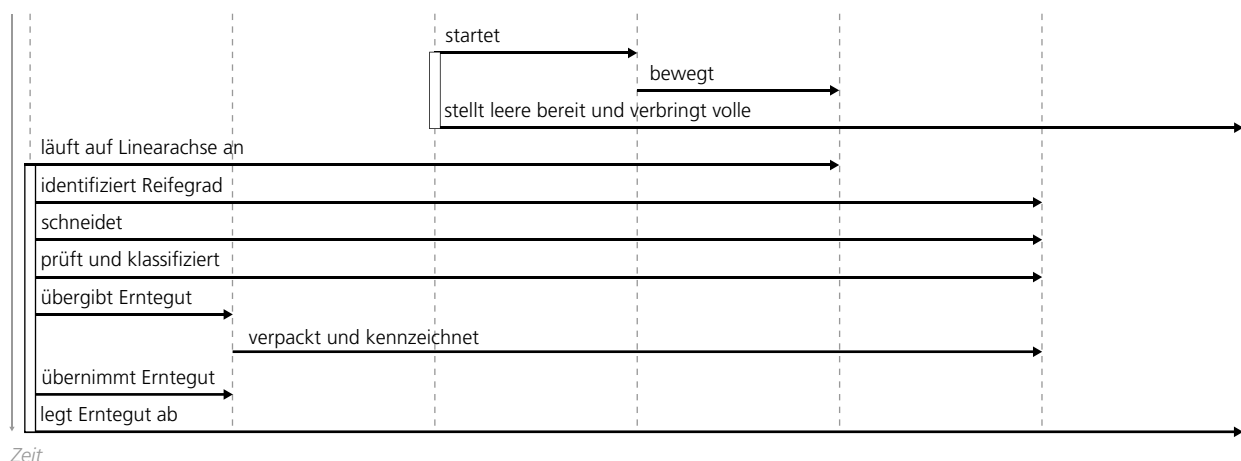


Abb. 3-4.4 Sequenzdiagramm für Ablauf der Ernte mit einem Roboter



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

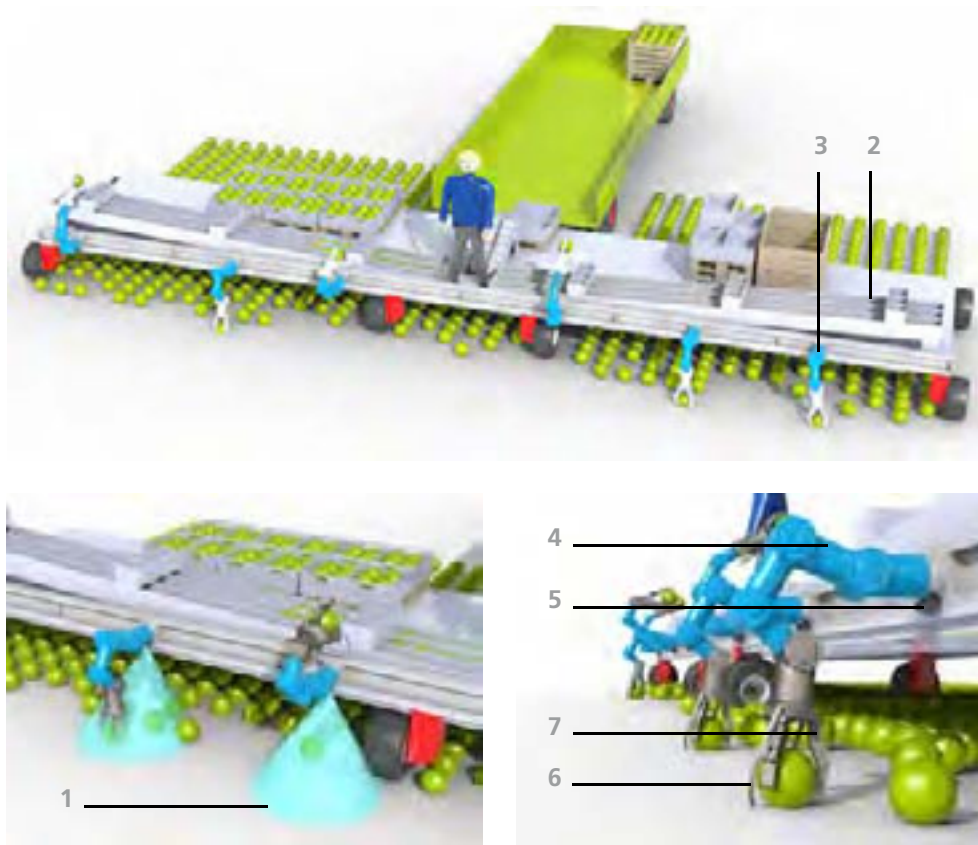
Weitere Varianten können diese Anforderung ggf. ohne Sensoren erfüllen. Jeder Roboterarm ist darüber hinaus mit Sensoren ausgestattet, die zur Identifikation und Lokalisierung der Früchte sowie zur Bestimmung deren Reifegrades und deren Qualität geeignet sind. Somit ist gewährleistet, dass nur reife Früchte geerntet werden und diese direkt bei der Ernte in die jeweiligen Qualitätsstufen eingeteilt werden können. Eine Übergabe an bestehende Verpackungseinrichtungen fließt in die Arbeitsraumbetrachtung der Roboterarme ein.

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Den Roboterarmen kommt eine zentrale Rolle zu. Da nur 4

Freiheitsgrade benötigt werden, können die Roboterarme aus kompakten Einzelmodulen, z.B. von Schunk zusammengesetzt werden. Die Kinematik lässt sich dann den jeweiligen Anforderungen durch Auslegung der Verbindungselemente anpassen. Die Greifer gehören ebenfalls zu den zentralen Komponenten mit entsprechend hohen Anforderungen. Diese können entweder durch industrielle Lösungen erreicht werden (hoher TRL) oder durch applikationsspezifische Sonderlösungen (geringerer TRL). Eine Integration in die Umgebung ist nicht erforderlich, da die Erntemaschine wie gehabt auf dem Feld verfahren wird. Lediglich die Integration in die Erntemaschine ist notwendig. Hierbei können kommerzielle Linearachsen (hoher TRL) oder Spezialkonstruktionen (niedrigerer TRL) verwendet werden.

Roboterentwurf



- 1 Sensorerfassungsbereich
- 2 Verpackungseinheiten
- 3 Roboter an Linearachse
- 4 Roboterarm
- 5 Sensor zur Objekterkennung
- 6 Schneidevorrichtung
- 7 Fruchtschonender Greifer

Abb. 3-4.5 oben: Skizze eines Ernteroboters, unten: Detaildarstellungen Ernteroboter



BODENFRÜCHTEERNTTE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

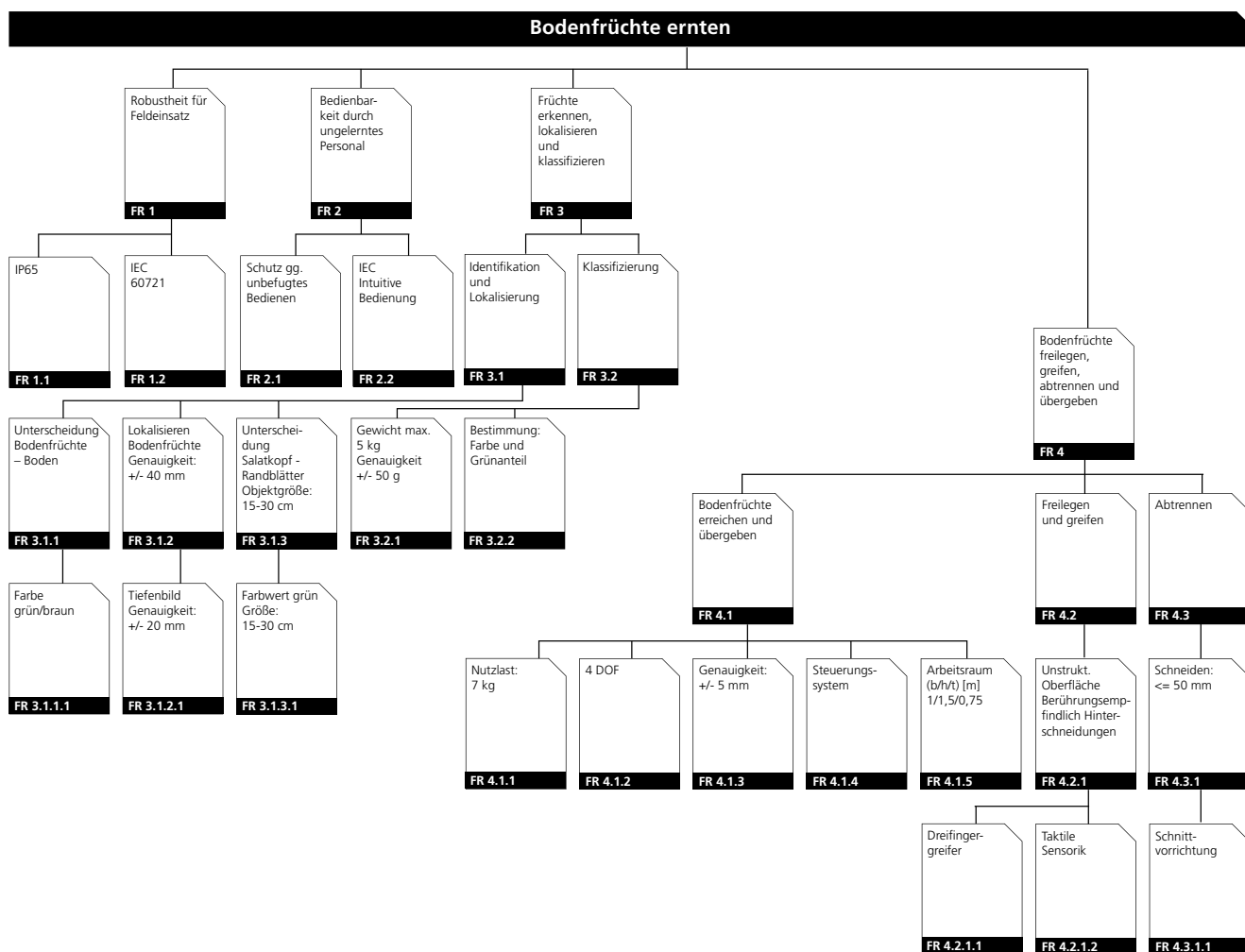


Abb. 3-4.6 Axiomatic Design – Functional Requirements



BODENFRÜCHTEERNTTE

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

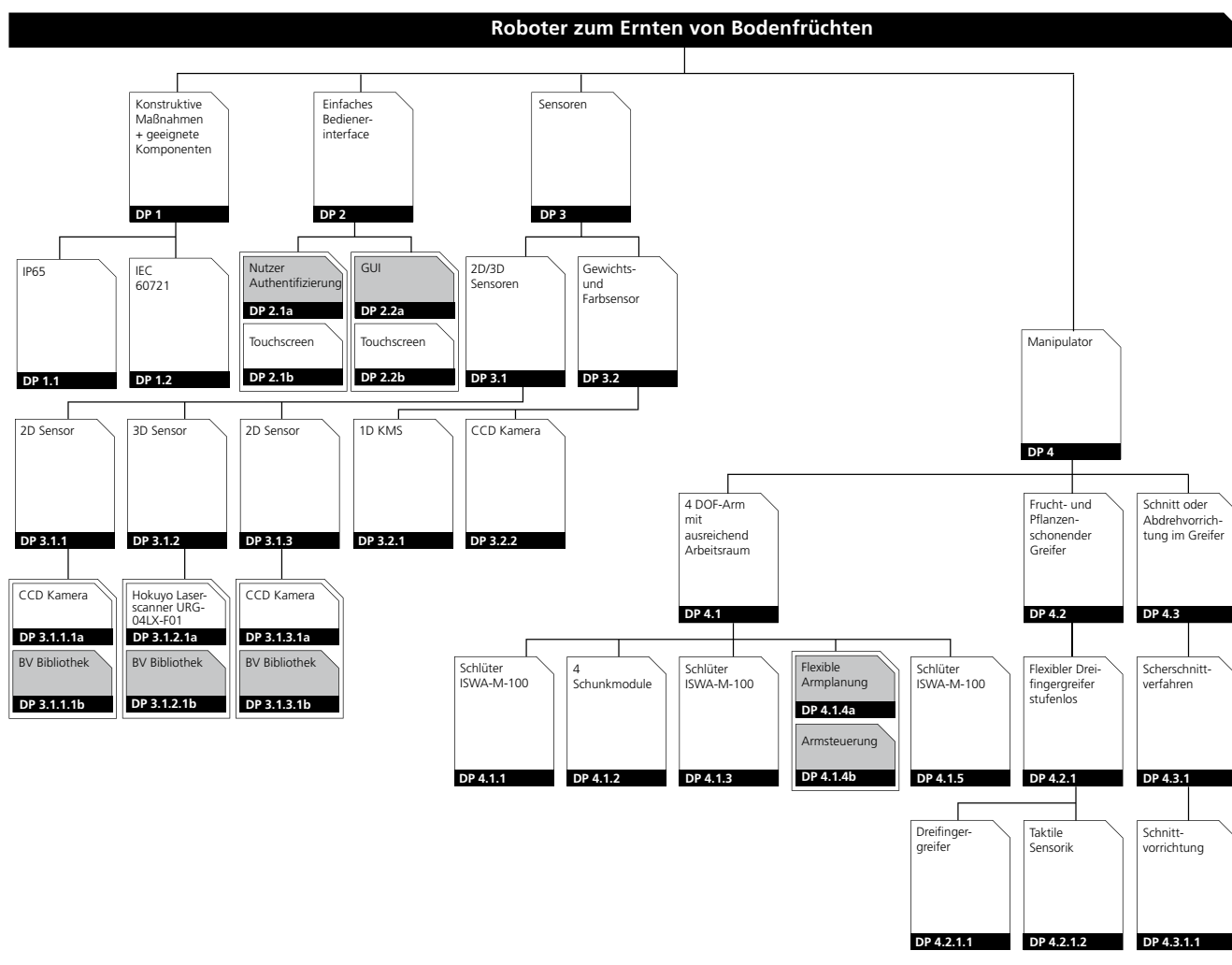


Abb. 3-4.7 Axiomatic Design – Design Parameters



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

TRL/€/FR-Diagramm

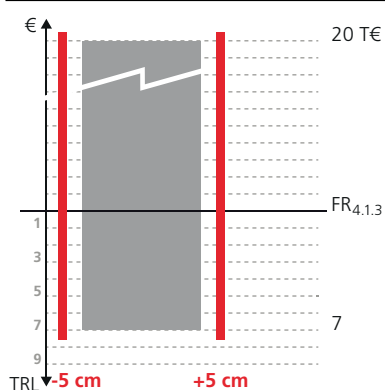


Abb. 3-4.8 TRL/€/FR-Diagramm für 4 DOF-Arm mit ausreichender Nutzlast (4 Schunkmodule)

TRL/€/FR-Diagramm

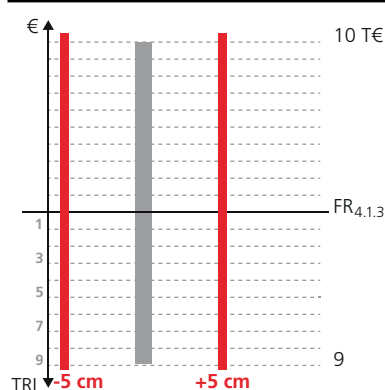


Abb. 3-4.10 TRL/€/FR-Diagramm für Linearachse, 1 m Hub, IP65 (Schlüter ISWA-M-100)

TRL/€/FR-Diagramm

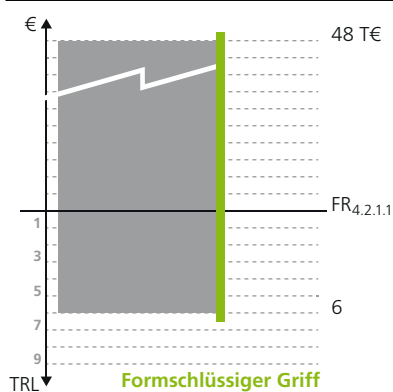


Abb. 3-4.9 TRL/€/FR-Diagramm für 3-Finger-Greifer mit Kraftsensorik (Schunk SDH-2)

2.2.2 Software

Folgende Softwarefunktionen werden benötigt:

- Grafische Benutzeroberfläche
 - Einfache Bedienführung mit Vermeidung von unbefugtem Bedienen
 - Komponenten verfügbar, geringer Anpassungsaufwand

- Objekterkennung
 - Sortenreine Erkennung von Objekten
 - Unstrukturierter Hintergrund
 - Wechselnde Beleuchtungsverhältnisse
 - Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig
- Objektlokalisierung
 - Positionsbestimmung erkannter Objekte auf ± 20 mm
 - Eigenentwicklung notwendig, nur einige Grundfunktionen verfügbar
- Armsteuerung
 - Trajektorienplanung und Bewegungsführung zum Greifen der Früchte
 - Eigen- und Fremdkollisionsvermeidung
 - Eigenentwicklung notwendig, Grundfunktionen verfügbar
- Ablaufsteuerung
 - Steuerung des gesamten Ablaufs (Erkennen, Lokalisieren, Greifen, Ablegen)
 - Synchronisierung zwischen Linearachse und Roboter
 - Grundkomponenten verfügbar, ablauf- und komponentenspezifische Anpassungen benötigt



BODENFRÜCHTEERNT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.3 Varianten

Die Variante B zielt auf eine Ersparnis bei Hardwarekomponenten zugunsten aufwändigerer Software und höherem anfänglichen Entwicklungsaufwand für Hardwarekomponenten. Für die Lokalisierung von Salatköpfen wird eine Kombination aus Abdunkelung, strukturierter Beleuchtung und CCD-Kameras eingesetzt. Hierbei wird die Tiefeninformation durch Bildverarbeitung und nicht wie beim Laserscanner mittels Laufzeitverfahren bestimmt.

Auf der Hardwareseite werden anwendungsspezifisch entwickelte Linearachsen gewählt. Die Anforderung an die Positioniergenauigkeit der Achsen wird auf ±10 mm reduziert, allerdings wird dann eine effizientere Armsteuerung und „Visual Servoing“ benötigt. Bei den Greifern wird eine einfache, anwendungsspezifische Konstruktion gewählt: Ein aktiver Freiheitsgrad mit passiv die Frucht umschließenden Fingern und einer Rutschkupplung zur Limitierung der Kräfte. Einem höheren Entwicklungsaufwand stehen hier deutlich reduzierte Stückkosten gegenüber.

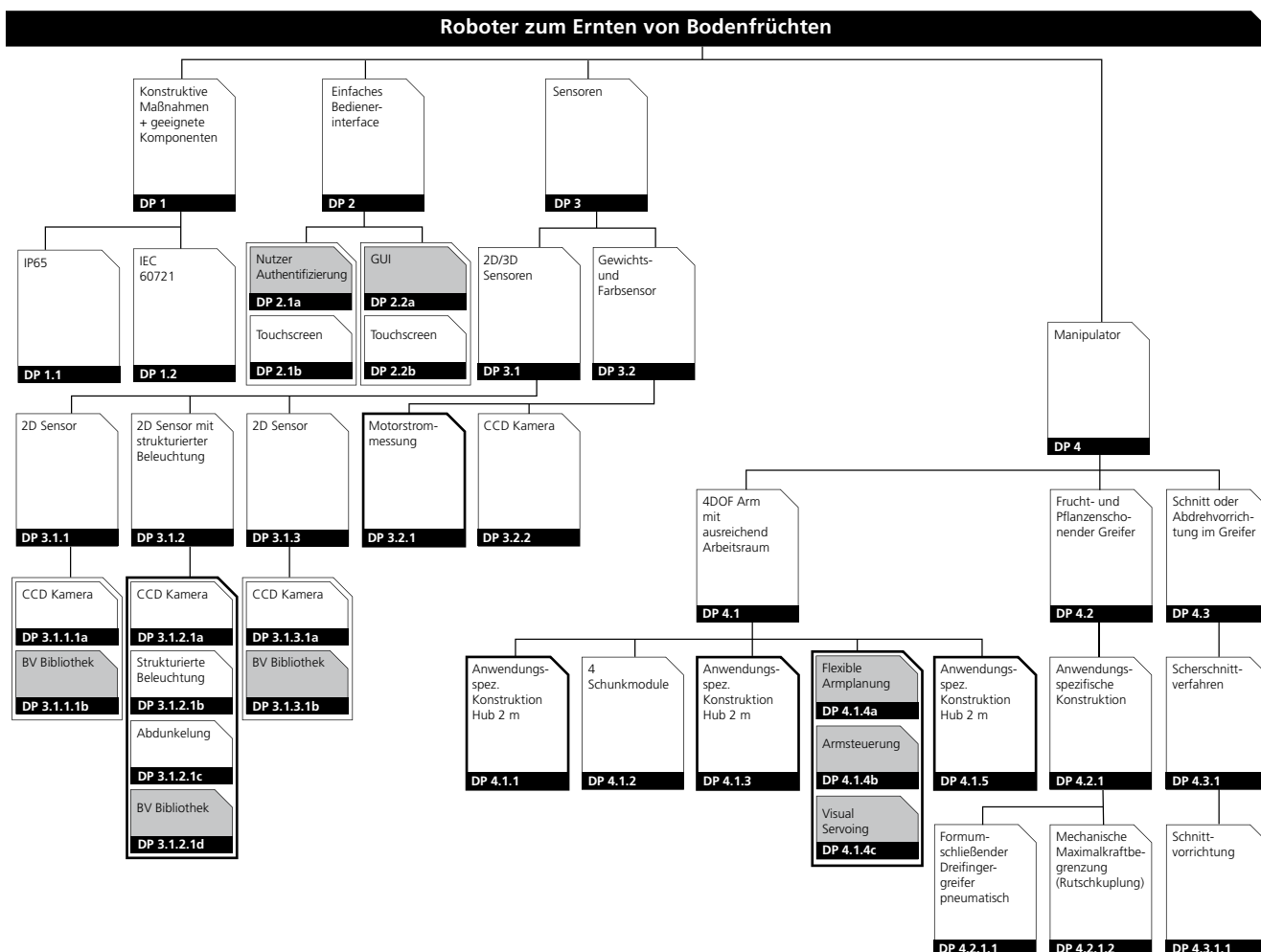


Abb. 3-4.11 Axiomatic Design – Design Parameters – SR-Variante B



BODENFRÜCHTEERNT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

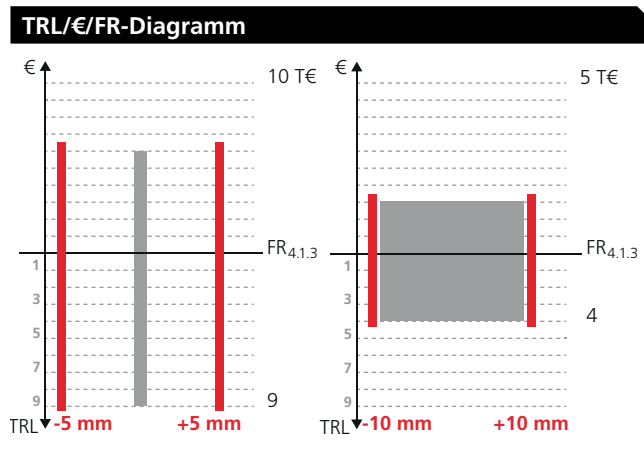
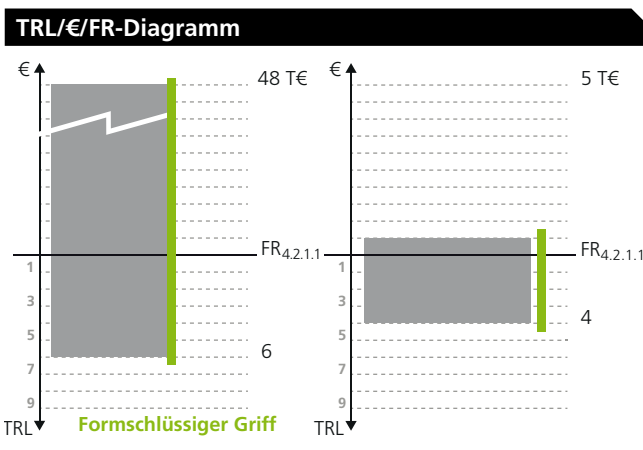


Abb. 3-4.12 TRL/€/FR-Diagramm Vergleich für Greifer:

Links: SR-Variante A: 3-Finger-Greifer mit Kraftsensorik (Schunk SDH-2);
 Rechts: SR-Variante B: 3-Finger-Greifer mit Kraftbegrenzung (Eigenbau vom Fraunhofer IPA)

Abb. 3-4.13 TRL/€/FR-Diagramm Vergleich für Linearachse:

Links: SR-Variante A: Linearachse, 1 m Hub, IP65 (Schlüter ISWA-M-100);
 Rechts: SR-Variante B: Linearachse, 2 m Hub, IP65 (Eigenbau vom Fraunhofer IPA)

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
FR 1.1 IP 65		DP 1.1 IP 65			2	Konstruktiv zu lösen
FR 1.2 IEC 60721		DP 1.2 IEC 60721			1	Konstruktiv zu lösen
FR 2.1 Schutz gg. unbefugtes Bedienen		DP 2.1a Nutzer Authentifizierung		8	0	Anpassung existierender Lösungen
		DP 2.1b Touchscreen	1 000 €	8	0	Systeme im Anwendungsbereich vorhanden
FR 2.2 Intuitive Bedienung		DP 2.2a GUI		8	1	Anpassung existierender Lösungen
		DP 2.2b Touchscreen	1 000 €	8	1	siehe DP 2.1b
FR 3.1.1.1 Farberkennung	grün/braun	DP 3.1.1.1a CCD Kamera	3 000 €	8	1	Robustheit für Einsatzumgebung und wechselnde Beleuchtung
		DP 3.1.1.1b BV Bibliothek		6	1	Anpassung existierender Lösungen, wechselnde Beleuchtung
FR 3.1.2.1 Tiefenbild	Genauigkeit: +/- 20 mm	DP 3.1.2.1a Hokuyo Laserscanner URG-04LX-F01	9 000 €	6	2	Robustheit für Einsatzumgebung
		DP 3.1.2.1b BV Bibliothek		5	2	Anpassung existierender, ggf. neue Lösungen



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
FR 3.1.3.1 Objektdifferenzierung	Farbwert grün Größe: 15 – 30 cm	DP 3.1.3.1a CCD Kamera	3 000 €	8	2	siehe DP 3.1.1.1a
		DP 3.1.3.1b BV Bibliothek		5	2	Anpassung existierender, ggf. neue Lösungen, wechselnde Beleuchtung
FR 3.2.1 Gewichtsmessung	max. 5 kg Genauigkeit +/- 50 g	DP 3.2.1 1D KMS	300 €	8	1	Konstruktive Anpassung existierender Lösungen
FR 3.2.2 Bestimmung: Farbe und Grünanteil		DP 3.2.2 CCD Kamera	3 000 €	8	1	siehe DP 3.1.1.1a
FR 4.1.1 Nutzlast: 7 kg	min. 7 kg	DP 4.1.1 Schlüter ISWA-M-100 Linearachse	120 000 €	8	1	Integration existierender Lösungen
FR 4.1.2 4 DOF	min. 4 DOF	DP 4.1.2 4 Schunkmodule	120 000 €	6	2	Robustheit für Einsatzumgebung und Handlungsgeschwindigkeit
FR 4.1.3 Greifgenauigkeit	+/- 5 mm	DP 4.1.3 Schlüter ISWA-M-100 Linearachse	120 000 €	8	2	siehe DP 4.1.1
FR 4.1.4 Steuerungssystem		DP 4.1.4a Armplanung		5	2	Flexible Bewegungs- und Greifplanung
		DP 4.1.4b Armsteuerung		6	2	Robustheit, Ausfallsicherheit
FR 4.1.5 Arbeitsraum	min. (b/h/t) [m] 1/1,5/0,75	DP 4.1.5 Schlüter ISWA-M-100 Linearachse	120 000 €	8	1	siehe DP 4.1.1
FR 4.2.1.1 Formschlüssiger Griff		DP 4.2.1.1 Dreifingergreifer	288 000 €	8	2	Integration existierender Lösungen
FR 4.2.1.2 Greifkraft	max. 1 N/cm ²	DP 4.2.1.2 Taktile Sensorik		6	2	Anpassung existierender Lösungen an Einsatzfall
FR 4.3.1.1 Schnittkraft	min. 50 N	DP 4.3.1.1 Konstruktion Schnittvorrichtung	300 €	4	0	Anwendungsspezifische Neukonstruktion unter Berücksichtigung der Robustheitsanforderungen

SR Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
FR 3.1.2.1 Tiefenbild	Genauigkeit: +/- 20 mm	DP 3.1.2.1a CCD Kamera	3 000 €	8	2	Robustheit für Einsatzumgebung
		DP 3.1.2.1b Strukturierte Beleuchtung	1 000 €	8	2	Robustheit für Einsatzumgebung
		DP 3.1.2.1c Abdunkelung	1 000 €	8	2	Integration existierender Lösungen



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
		DP 3.1.2.1d BV Bibliothek		5	2	Anpassung existierender, ggf. neue Lösungen
FR 3.2.1 Gewichtsmessung	max. 5 kg Genauigkeit +/-50 g	DP 3.2.1 Motorstrommessung	300 €	6	2	Anpassung existierender Lösungen
FR 4.1.1 Nutzlast: 7 kg	min. 7 kg	DP 4.1.1 Anwendungsspez. Konstruktion Hub 2 m	40 000 €	5	1	Anwendungsspezifische Neukonstruktion unter Berücksichtigung der Robustheitsanforderungen
FR 4.1.3 Greifgenauigkeit	+/-5 mm	DP 4.1.3 Variante Anwendungsspez. Konstruktion Hub 2 m	40 000 €	5	2	siehe DP 4.1.1
FR 4.1.4 Steuerungssystem		DP 4.1.4a Flexible Armplanung		5	2	Flexible Bewegungs- und Greifplanung, Ausgleich von Positionierungsungenauigkeiten der Linearachse
		DP 4.1.4b Armsteuerung		6	2	Robustheit, Ausfallsicherheit
		DP 4.1.4c Visual Servoing		5	2	Anpassung existierender Lösungen an Einsatzfall
FR 4.1.5 Arbeitsraum	min. (b/h/t) [m] 1/1,5/0,75	DP 4.1.5 Anwendungsspez. Konstruktion Hub 2 m	40 000 €	5	1	siehe DP 4.1.1
FR 4.2.1.1 Formschlüssiger Griff		DP 4.2.1.1 Formumschließender Dreifingergreifer pneumatisch	60 000 €	5	2	Anwendungsspezifische Neukonstruktion unter Berücksichtigung der Robustheitsanforderungen
FR 4.2.1.2 Greifkraft	max. 1 N/cm ²	DP 4.2.1.2 Mechanische Maximalkraftbegrenzung (Rutschkupplung)	Inkl. in DP 4.2.1.1	4	2	Anwendungsspezifische Neukonstruktion unter Berücksichtigung der Robustheitsanforderungen

Tab. 3-4.1 Komponentenübersicht





01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Manuelle Variante	
Grunddaten Use Case						
• Lebensdauer (a)		5		5		5
• Anzahl Roboter (System)		6		6		-
• Eff. Produktivzeit (h/a)		3 600		3 600		4 560
• Personalstunden (h/a)		14 400		14 400		134 400
• Leistungseinheiten (Mio LE/a)		18,1		18,1		23,0
LCC-Summe (T€)	3 378,5	100,0%	2 871,6	100,0%	5 040,0	100,0%
• Investition (T€)	704,1	20,8%	297,2	10,3%	-	-
• Installationskosten (T€)	16,0	0,5%	16,0	0,6%	-	-
• Aktivitätskosten (T€)	2 462,4	72,9%	2 464,1	85,8%	5 040,0	100,0%
• Wartung / Instand. (T€)	196,0	5,8%	94,3	3,3%	-	-
• Andere	-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)	-2 735,6		-2 252,9		-3 821,1	
Softwarekosten (T€)	903,1		2 994,9		-	
Leistungskosten (€/LE)	0,04		0,03		0,04	

Tab. 3-4.2 LCC

Erläuterung zu Tab. 3-4.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tab. 3-4.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt:

Grunddaten: Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen, europaweiten Einsatz des Ernteroboters ausgegangen (300 Tage aktiv, Rest Transfer zu Einsatzorten). Der Ernteroboter wird in einem Zwei-Schicht-Modell bei 8 h Schichtdauer mit jeweils 3 Personen eingesetzt. Die Verfügbarkeit des Roboters wird mit 75% angesetzt (technischer Ausfall), so dass die effektive Produktivzeit 3 600 h/a beträgt. Die nominale Ernteleistung beträgt 5 040 Stück/h.
SR-Variante B: Keine Änderung.

Manuelle Variante: In der manuellen Variante wird bei gleicher nomineller Ernteleistung eine Verfügbarkeit von 95% angesetzt, so dass sich die effektive Produktivzeit entsprechend erhöht. Weiterhin sind 28 Personen pro Schicht notwendig.

Investition: Relevant für den Vergleich der Lebenszykluskosten über die verschiedenen Alternativen sind hier nur die

zusätzlichen Kosten für die Roboter – die sonstige Peripherie/Infrastruktur ist über alle Alternativen gleich (Zugmaschine, Rahmen, etc.). Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (90,1 Tsd Euro pro Roboter sowie einer gemeinsamen Systemperipherie (1 Tsd Euro) zusammen; 1 Tsd Euro Infrastruktur) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.
SR-Variante B: Im Gegensatz zu SR-Variante A setzen sich die Systemkosten aus den Kosten der Roboterkomponenten (35,9 Tsd Euro pro Roboter) sowie einer gemeinsamen Systemperipherie (13 Tsd Euro) zusammen – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.
Manuelle Alternative: Keine zusätzliche Investition notwendig.
Installationskosten: Sowohl für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Roboters als auch für die Schulung wird jeweils ein externer Personalaufwand von 10 PT (80 Ph) angesetzt (100 Euro/Ph). Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen.
SR-Variante B: Keine Änderung.



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Manuelle Variante: Keine Aufwände.

Aktivitätskosten: Die Personalkosten werden für die Bediener mit 34 Euro/h angesetzt (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten). Der Energieverbrauch pro Roboter beträgt 0,518 kW pro Roboter während der Produktivzeit (11 189 kWh / a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt. Sonstige, kostenwirksame Betreuungsaufwände (z.B. Beheben kleinerer technischer Probleme; Reinigung der Sensoren) fallen nicht an, da diese durch das höher qualifizierte Personal im Bedarfsfall direkt mit übernommen werden.

SR-Variante B: Der Energieverbrauch während der Produktivzeit beträgt pro Roboter 0,433 kW (9 352,8 kWh/a) – hinzu kommen 1,2 kWh für die gemeinsam genutzte Peripherie (4 320 kWh/a). Ansonsten keine Änderung.

Manuelle Variante: Es wird nur geringer qualifiziertes Personal eingesetzt (Saisonarbeiter; Lohnkosten 5 Euro/h + 50% Personalnebenkosten).

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von 100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

SR-Variante B: Keine Änderung.

Manuelle Variante: Keine zusätzlichen/anderen Aufwände

Softwarekosten: geschätzt nach der vorgestellten Methodik (s. [2.3.1.2](#)) 903,1 Tsd Euro für SR-Variante A bzw. 2 994,9 Tsd Euro für SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

- Bei den Serviceroboter-Anwendungsfällen handelt es sich um 100%ige Automatisierungslösungen im Vergleich zur manuellen Variante, bei denen die menschliche Arbeitsleistung der Ernter/Verpacker während der Produktivzeit des Systems vollständig substituiert wird. Es wird davon ausgegangen, dass das System voll ausgelastet ist.
- **Kostenstruktur:** Auch in den SR-Varianten A und B dominieren die Aktivitätskosten mit mehr als 70% bzw. 85% den Großteil der Lebenszykluskosten, was fast ausschließlich auf die Lohnkosten der verbliebenen Arbeitskräfte zurückzuführen ist. Absolut gesehen haben sich die Personalkosten (die in beiden Serviceroboter-Varianten gleich sind) mehr als halbiert (490,9 p.a. vs. 1 008,0 Tsd Euro p.a.). Beide Serviceroboter-Varianten unterscheiden sich nur in Bezug auf die notwendigen Anfangsinvestitionen.
- **Wirtschaftlichkeit:** Nach der vorliegenden LCC-Betrachtung stellt sich keine der Serviceroboter-Varianten gegenüber der konventionellen Durchführung ungünstiger dar – SR-Variante B führt sogar zu deutlich besseren Stückkosten (Stückkosten von 0,04/0,03 Euro/LE vs. 0,04 Euro/LE). Dieser Vergleich gilt allerdings nur unter der „Vollauslastungsannahme“ und resultiert aus der deutlich geringeren, angenommenen Verfügbarkeit der Serviceroboter-Varianten (75% vs. 95%).⁶ Aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF sind die Serviceroboter-Varianten deutlich günstiger als die manuelle Arbeiterbringung (-2 735,6/-2 252,9 vs. -3 821,1 Tsd Euro).⁷

⁶ Annahme: Die höhere Ernteleistung der manuellen Variante wird auch tatsächlich benötigt.

⁷ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).





01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Bzgl. der laufenden Kosten führen die SR-Varianten A oder B im Vergleich zur manuellen Variante zu einer Ersparnis von 1 320,6 bzw. 1 420,5 Tsd Euro, so dass sich die Investition in der SR-Variante A innerhalb von 3 Jahren amortisiert – bei SR-Variante B sogar in einem Zeitraum von knapp einem Jahr.⁸

- **Sensitivität:** Auf Grund der Kostenstruktur sowie der unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Verfügbarkeit kommen als für eine Sensitivitätsanalyse relevante Parameter insbesondere die „Verfügbarkeit“ des Systems, die Lohnkosten sowie die „Vollauslastungsannahme“ in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Szenarien ähnlich und proportional oder sind im Vergleich zu der Gewichtung bzgl. der Aktivitätskosten irrelevant):
 - Bei gleicher Verfügbarkeit der Serviceroboter-Systeme (95%) reduzieren sich die Stückkosten auch für SR-Variante A auf 0,03 Euro/LE.
 - Unter der Annahme von Lohnkostensteigerungen im Niedriglohnbereich (von 5 auf 7,5 auf 10 Euro + Nebenkosten) erhöhen sich die Stückkosten der manuellen Variante, trotz höherer Verfügbarkeit schon auf 0,07/0,09 Euro/LE und sind damit den manuellen Varianten deutlich unterlegen.

Begrenzt man die maximale notwendige Ernteleistung, die das System erbringen muss auf ~18 Mio, so ändert dies nichts an den Stückkosten von bei 0,04 Euro/LE in der manuellen Variante, da sich die Lebenszykluskosten im gleichen Maße reduzieren. Zu beachten ist jedoch, dass sich durch den geringeren (und zu entlohnenden) Arbeitsaufwand der DCF der manuellen Variante ebenfalls signifikant auf 3 018,7 Tsd Euro verringert – er liegt aber immer noch unter denen der Serviceroboter-Varianten.

⁸ Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante B = $0,75/0,95 * 5 040 - (2 464,1 + 94,3) = 1 420,5$ >> $(297,2 + 16,0)$. Amortisationsdauer = $(297,2 + 16,0) / 1 420,5 * 5 = 1,1$. Die Amortisationsrechnung bedingt eine Angleichung des Leistungsvolumens aller zu vergleichenden Alternativen. Daher müssen die Kosten der manuellen Alternative entsprechend der geringeren Leistungsmenge der SR-Variante angepasst werden (es fallen nur Aktivitätskosten an – diese verhalten sich proportional zur Leistungsmenge; $75\% / 95\% = 0,79$).

3.2 Nutzwert

Der einzige Nutzwert des vorliegenden Szenarios liegt in der kontrollierten, pflanzenschonenden Handhabung der Früchte, was zu einem geringeren Qualitätsverlust führt.





01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 4 MARKTPOTENZIALE

4 Marktpotenziale

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Gesamtmarkt auf Basis wesentlicher Marktstrukturdaten charakterisiert, um darauf basierend spezifische Aussagen zum Investitionsverhalten abzuleiten. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Land- und Viehwirtschaft“

2007 betrug die Bruttowertschöpfung in der Landwirtschaft 16,0 Mrd Euro (Produktionswert 46,3 Mrd Euro; Vorleistungen 30,3 Mrd Euro.).⁹ Dabei bewirtschafteten 370,5 Tsd Betriebe rund 17 Mio Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche und beschäftigten 1 251 Mio Arbeitskräfte (davon 336,3 Tsd Saisonarbeitskräfte) – die tatsächliche Arbeitsleistung entsprach 529,7 Tsd Vollzeitäquivalenten. Etwa 95% der landwirtschaftlichen Betriebe sind Familienbetriebe – sie bewirtschaften aber weniger als ein Viertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche. 55% der Betriebe übt landwirtschaftliche Tätigkeiten nur im Nebenerwerb aus. Die dominierende Rechtsform der Betriebe ist das Einzelunternehmen mit einem Anteil von 93,5%, gefolgt von Personengesellschaften (5,1%) und juristischen Personen (1,4%). Bezogen auf die bewirtschafteten Flächen bewirtschaften juristische Personen im Durchschnitt 561,6 Hektar,

Personengesellschaften 125,7 Hektar und Einzelunternehmen 33,1 Hektar.

Die betrieblichen Strukturen in der Landwirtschaft unterliegen einem fortlaufenden Wandel, dessen Haupttreiber nicht nur der technische und züchterische Fortschritt, sondern auch der zunehmende Wettbewerb, die demografische Entwicklung sowie Agrarpolitik sind. Kennzeichnende Merkmale dieses Wandels sind neben der weiterhin stark abnehmenden Anzahl der Betriebe (1999: 461,9 Tsd, 2007: 370,5 Tsd Betriebe) insbesondere folgende Faktoren:

- die weiterhin zunehmende Produktivität,
- der daraus resultierende abnehmende Arbeitseinsatz (relativ und absolut) sowie
- die zunehmende Flächen- und Betriebsgrößenkonzentration.

⁹ Die folgenden Ausführungen basieren, soweit nicht anders erwähnt, auf aktuellen Daten des statistischen Bundesamtes (Stand Oktober 2010, www.destatis.de) sowie: Statistisches Bundesamt (2009): Landwirtschaft in Deutschland und der Europäischen Union 2009 (<https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfq/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,Warenkorb.csp&action=basketadd&id=1024185>)





01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 4 MARKTPOTENZIALE

Leistungsarten	Einheit	1999	2003	2005	2007
Deutschland					
Betriebe	1 000	461,9	412,3	389,9	370,5
• Landwirtschaftlich genutzte Fläche insgesamt	1 000 ha	17 119,2	16 981,8	17 035,2	16 931,9
• Landwirtschaftlich genutzte Fläche je Betrieb	ha	37,1	41,2	43,7	45,7
Arbeitskräfte insgesamt	1 000	1 437,0	1 303,3	1 276,4	1 251,4
• davon Familienarbeitskräfte	1 000	940,8	822,7	782,7	728,6
• davon Ständig beschäftigte familienfremde Arbeitskräfte	1 000	195,9	191,4	187,4	186,6
• davon Nicht ständig beschäftigte familienfremde Arbeitskräfte	1 000	300,3	289,2	306,3	336,3
Betriebliche Arbeitsleistung insgesamt	1 000 AK-E*	612,3	588,3	559,1	529,7
• Betriebliche Arbeitsleistung je 100 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche	AK-E* je 100 ha	3,6	3,5	3,3	3,1

* AK-E: Arbeitskraft-Einheit

Tab. 3-4.3 Ausgewählte Strukturdaten (Statistisches Bundesamt 2009)¹⁰

Der betriebliche Arbeitseinsatz ist gegenüber 1999 um 14% gesunken (vgl. Tab. 3-4.3) – gleichzeitig bewirtschaften die Betriebe trotz insgesamt zurückgehender Nutzflächen und Betriebszahlen im Durchschnitt fast 25% mehr Fläche. Diese hohen Produktivitätsfortschritte werden jedoch bei weitem nicht von allen Unternehmen erreicht. Nach aktuellen Zahlen des Statistischen Bundesamts zur Landwirtschaft in Deutschland wird die aktuelle "Wachstumsschwelle" der Betriebe in dieser Hinsicht auf mindestens 75 Hektar geschätzt. Diese Größe erreichen jedoch nur etwa 13% der Betriebe, so dass damit zu rechnen ist, dass die Größenkonzentration der Betriebe auch in Deutschland weiter zunehmen wird. Schon heute bewirtschaften sie fast 62% der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Hinsichtlich der Rechtsform ist festzustellen, dass gerade Personengesellschaften in der Vergangenheit ihre durchschnittlich bewirtschafteten Flächen vergrößert haben (+26% gegenüber 1999), während Kapitalgesellschaften und Genossenschaften einen Verlust zu verzeichnen hatten (-2% gegenüber 1999).

¹⁰ Bei den Daten in dieser Tabelle handelt es sich um repräsentative Ergebnisse des Statistischen Bundesamtes, die daher von denen der Totalerhebung – ebenfalls vom Statistischen Bundesamt – abweichen können. Statistisches Bundesamt (2009).

Lage:

Das allgemeine Stimmungsbild in der Landwirtschaft hat sich stark verschlechtert. Die aktuelle wirtschaftliche Situation bewerten die Landwirte im Durchschnitt mit der Schulnote 3,73.¹¹ Hinsichtlich der betrieblichen Ertragslage verzeichneten die Hauptideerwerbsbetriebe nach zuletzt sehr dynamischen Steigerungen im Berichtsjahr 2008/2009 einen Gewinnrückgang von fast 23% – wobei sich die landwirtschaftlichen Hauptideerwerbszweige sowohl in ihrer Dynamik wie Tendenz durchaus erheblich voneinander unterscheiden: So ist der Gewinnrückgang mit -45,5% in der Milchviehwirtschaft deutlich stärker als im Ackerbau (-12,9%), während der Bereich Veredlung einen Anstieg von +242% verzeichnen konnte.¹² Insgesamt ist die Landwirtschaft weiterhin ein in seiner wirtschaftlichen Entwicklung zwar dynamischer, aber auch sehr unstetiger Markt.

¹¹ Deutscher Bauernverband (2010): Situationsbericht 2010 (www.situations-bericht.de)

¹² BMELV (2009): Buchführungsergebnisse Landwirtschaft. Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe 2008/2009 (<http://www.bmelv-statistik.de>)



BODENFRÜCHTEERNT

→ 4 MARKTPOTENZIALE

Investitionsverhalten:

Die beschriebenen Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft konnten nur durch den vermehrten Technologieeinsatz erreicht werden – entsprechend stark ist die Kapitalintensität in der Landwirtschaft (Bruttoanlageinvestitionen 2008: 8 918 Mio Euro – davon 5 150 Mio Euro in Ausrüstungen).¹³ Mit 284 000 Euro Kapital je Erwerbstätigem gehört die Landwirtschaft zu den kapitalintensivsten Branchen der deutschen Wirtschaft.¹⁴ Die verfügbaren Finanzmittel werden nach aktuellen Daten des BMELV mit 117,4 Tsd Euro je Unternehmen angegeben – davon bleiben nach Abzug der Entnahmen durchschnittlich 32,9 Tsd Euro für Investitionen übrig.¹⁵ Aufgrund des engen finanzwirtschaftlichen Rahmens wird die Entscheidungsfindung in allen größeren landwirtschaftlichen Unternehmen systematisch und aus einem betriebswirtschaftlichen Kalkül heraus erfolgen.¹⁶ Bzgl. der Investition in neue Technologien hat man festgestellt, dass diese auch in der Landwirtschaft nicht nur von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Betriebs, sondern auch von anderen, qualitativen Faktoren abhängen – insbesondere dem Ausbildungsniveau und dem Alter der Entscheider.^{17,18}

Zusammenfassend lassen sich aus den obigen Darstellungen folgende Aussagen zum Investitionsverhalten in der Land- und Viehwirtschaft ableiten:

- Wirtschaftlicher Erfolg hängt von einem zunehmenden Kapitaleinsatz in den Betrieben ab.

- Die dafür notwendigen Finanzmittel werden nur große bis sehr große Unternehmen aufbringen können.
- Aufgrund der begrenzten Finanzierungsmittel und der oftmals nicht stabilen Marktentwicklung werden insbesondere finanzwirtschaftliche Kennzahlen wie Cashflow und Gewinn die Investitionsentscheidung der Landwirte beeinflussen.
- Dabei ist davon auszugehen, dass die zur Beurteilung der Investitionsentscheidung notwendigen betriebswirtschaftlichen Kenntnisse in den relevanten Betrieben vorhanden sind und zur Anwendung kommen.
- Qualitative Faktoren spielen zwar eine Rolle, werden jedoch erst relevant, wenn die absolute Wirtschaftlichkeit der Investition sichergestellt ist.

¹³ BMELV (2010): *Statistisches Jahrbuch* (<http://www.bmelv-statistik.de/de/statistisches-jahrbuch/kap-c-landwirtschaft>)

¹⁴ Deutscher Bauernverband (2010): *Situationsbericht 2010* (www.situations-bericht.de)

¹⁵ BMELV (2009): *Buchführungsergebnisse Landwirtschaft. Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe 2008/2009* (<http://www.bmelv-statistik.de>)

¹⁶ U.a. auch bestätigt durch die in dieser Studie befragten Experten.

¹⁷ Liao, B.; Martin, P. (2009): *Farm innovation in the broadacre and dairy industries, 2006-07 to 2007-08*. Australian Bureau of Agriculture and Resource Economics (ABARE).

¹⁸ Diederer, P. et al. (2003): *Innovation Adoption in agriculture: innovators, adopters and laggards*. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, Nr. 67.





BODENFRÜCHTEERNT

→ 4 MARKTPOTENZIALE

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Gemüseanbau“

Entsprechend dem hier definierten Anwendungsszenario umfasst der hier relevante Markt alleine den Produktionsgartenbau – Bereich Gemüseanbau. Alle anderen Bereiche des Gartenbaus (Blumen/Zierpflanzen, Baumschulen, Obstanbau) sowie der Getreideanbau werden hier nicht betrachtet, da sie nicht in den Anwendungsbereich der hier betrachteten Serviceroboter-Lösung fallen. Wesentliche Strukturdaten sind Tab. 3-4.4 zu entnehmen.

Gewächshäuser haben nur einen Flächenanteil von knapp 2% und werden daher vernachlässigt.

Betriebe (Anzahl) und Nutzfläche (in ha)	2 021 / 35 556
davon < 5 ha	1 148 / 2 060
davon 5 – 30 ha	557 / 7 041
davon > 30 ha	316 / 26 455
Betriebe im Haupterwerb*	~1 570
Beschäftigte (VZÄ, Köpfe)**	29 738, 121 163
Produktionswerte (Mio €; Gemüse)	2 149
Freilandflächenanteil***	~2%

* Schätzung: Anteil der Haupterwerbsbetriebe im Gemüsebau 77,7%. Statistisches Bundesamt (2006): Ergebnisse der Gartenbauerhebung 2005 (www.destatis.de).

** Statistisches Bundesamt (2006): Fachserie 3: Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Gartenbauerhebung 2005 (www.destatis.de).

*** Ebenda.

Tab. 3-4.4 Strukturdaten Gemüseanbau 2007¹⁹

¹⁹ Das Datenmaterial bezieht sich soweit nicht anders vermerkt auf die im zweijährigen Turnus durchgeführte Agrarstrukturhebung des Statistischen Bundesamtes – Zahlen für 2007 (2008, 2009 nur als Schätzungen verfügbar). BMELV (2010): Ertragslage Garten- und Weinbau 2010. Alternatives Datenmaterial liefert das Statistische Bundesamt mit seiner Gartenbauerhebung (Fachserie 3), welches aufgrund unterschiedlicher, statistischer Abgrenzungen andere Strukturdaten ausweisen kann. Da Letztere allerdings nur im zehnjährigen Modus erscheint, wird im Folgenden soweit als möglich auf den Daten der Agrarstrukturhebung aufgesetzt.

Der Gartenbau zeichnet sich im Vergleich zur übrigen Landwirtschaft nicht nur durch den Einsatz besonderer Produktionstechniken aus, sondern ist auch vergleichsweise arbeitsintensiv.^{20,21} Folglich konnte in den vergangenen Jahrzehnten ein vermehrter Kapitaleinsatz in den Betrieben zur Rationalisierung der Leistungsprozesse beobachtet werden (vgl. Abb. 3-4.14). Allerdings ist dieser Kapitaleinsatz gerade im Gemüseanbau auf eine weitere Spezialisierung einzelner Betriebe zurückzuführen sowie auf eine effektivere Bodenbewirtschaftung durch die wenigen Großbetriebe, die die vorhandenen Flächen z.T. durch Technikeinsatz besser bewirtschaften konnten.²² Im Durchschnitt liegen die Nettoinvestitionen der Gemüsebaubetriebe selten im positiven Bereich. Der Großteil der Betriebe lebt folglich von seiner Substanz. Die Investitionstätigkeit ist daher in der Regel auf einzelne Großbetriebe zurückzuführen. Diese Entwicklung wird sich in der Zukunft noch verstärken, da die Betriebsgröße insgesamt gerade im Gartenbau die wichtigste Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg zu sein scheint.²³

²⁰ Statistisches Bundesamt (2006): Ergebnisse der Gartenbauerhebung 2005 (www.destatis.de).

²¹ Dirksmeyer, W. (2009): Status quo und Perspektiven des deutschen Produktionsgartenbaus. Landbauforschung Sonderheft 330. Johann Heinrich von Thünen-Institut (http://www.bfafh.de/bibl/lbf-pdf/landbauforschung-sh/lbf_sh330.pdf).

²² Experteninterview mit der Behr AG.

²³ Dirksmeyer, W. (2009): Status quo und Perspektiven des deutschen Produktionsgartenbaus. Landbauforschung Sonderheft 330. Johann Heinrich von Thünen-Institut (http://www.bfafh.de/bibl/lbf-pdf/landbauforschung-sh/lbf_sh330.pdf).





BODENFRÜCHTEERNT

→ 4 MARKTPOTENZIALE

Diagramme

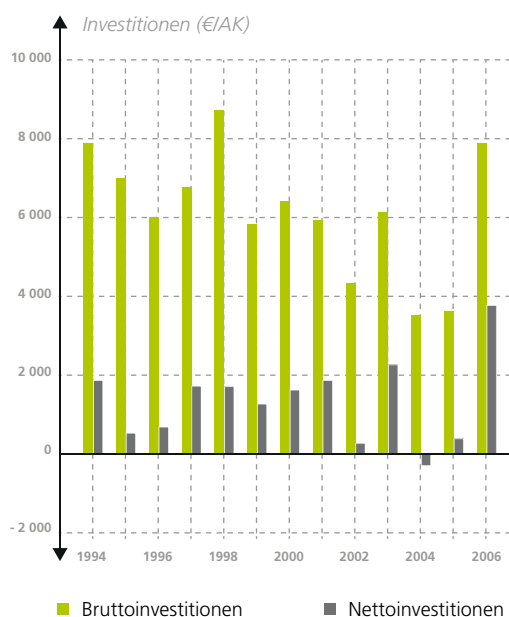
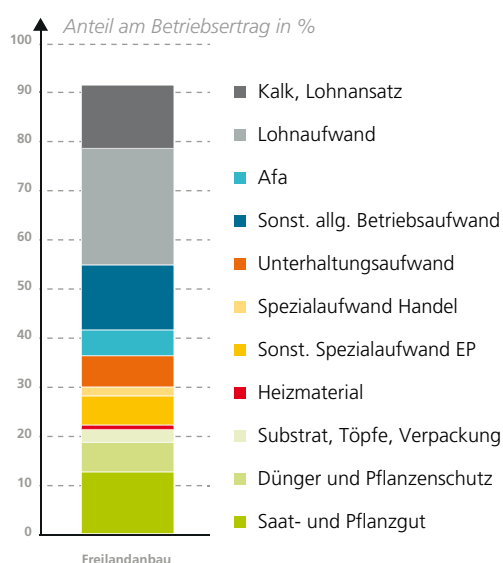


Abb. 3-4.14 Kostenstruktur und Investitionsverhalten im Freiland-Gemüseanbau²⁴

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Anwendungsfall von Servicerobotern bezieht sich ausschließlich auf den Einsatz im Freiland-Gemüseanbau. Er betrifft daher nur einen Bruchteil der landwirtschaftlichen Betriebe. Aus diesem Grund wird auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamts der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-4.5):

- Statistisch relevanter Sektor ist die „Landwirtschaft“, Bereich „Gartenbau“, Teilbereich „Gemüseanbau“²⁵
- Nur Großbetriebe²⁶

Landwirtschaftliche Betriebe insgesamt	374 514
• davon Gartenbau	12 153
• davon Gemüseanbau	2 021
davon im Zielmarkt (Haupterwerb, > 30 ha)	316

Tab. 3-4.5 Ableitung des relevanten Zielmarkts

²⁴ Dirksmeyer, W. (2009): Status quo und Perspektiven des deutschen Produktionsgartenbaus. Landbauforschung Sonderheft 330. Johann Heinrich von Thünen-Institut (http://www.bfahf.de/bib/lbf-pdf/landbauforschung-sh/lbf_sh330.pdf).

²⁵ Statistisches Bundesamt (2006): Fachserie 3: Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Gartenbauerhebung 2005 (www.destatis.de).

²⁶ Hier Betriebe mit Fläche > 30 ha (vgl. Bild 16); nach den Buchführungsergebnissen des BMELVs hat das obere Drittel der gewinnstärksten Betriebe eine Nutzfläche von durchschnittlich ~25,5 ha. BMELV (2010): Ertragslage Garten- und Weinbau 2010 (<http://www.bmelv-statistik.de>).



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 4 MARKTPOTENZIALE

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt werden demnach 316 Betriebe als potenzielle Kunden für das hier beschriebene Anwendungsszenario angenommen. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-4.6):

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme ist nicht direkt verfügbar. Aus einer detaillierten Erhebung des BMELV geht hervor, dass dem oberen Drittel der gewinnstärksten Haupterwerbsbetriebe im Gemüseanbau 2008/2009 durchschnittlich etwa 1 553 Euro pro ha Nutzfläche zur Verfügung stehen.²⁷ Bei einer Gesamtnutzfläche von 26 455 ha investierten die 316 hier relevanten Haupterwerbsbetriebe eine Summe von 41 084,6 Tsd Euro (bzw. 130,0 Tsd Euro pro Betrieb).
- Auf Maschinen- und Anlagen entfallen davon ca. 17 255,5 Tsd Euro (bzw. 54,6 Tsd Euro).²⁸
- In Ermangelung besserer Daten wird angenommen, dass davon ca. 25% auf Serviceroboter-Investitionen entfallen, so dass das hier relevante Marktpotenzial auf insgesamt 4 313,9 Tsd Euro abgeschätzt wird.
- Zu beachten ist, dass jedes im vorliegenden Szenario betrachtete Serviceroboter-System im Grunde 6 Roboterarme beinhaltet. Bei einem Systempreis von 704,1 Tsd Euro könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~36 Roboterarmen (also 6 Serviceroboter-Systemen) führen – was letztlich zu einer Installed Base von 180 Roboterarmen (also 30 Serviceroboter-Systemen) im eingeschwungenen Marktzustand führen würde (Lebensdauer 5 Jahre). Für SR-Variante B ergeben sich bei einem Systempreis von 310,2 Tsd Euro Werte von ~84 Servicerobotern (14 Serviceroboter-Systemen) pro Jahr bzw. 420 Serviceroboter (70 Serviceroboter-Systeme) als Installed Base.

Aufgrund der positiven LCC-Betrachtung (vgl. [Kapitel 3.4.3.1](#)) sind keine weiteren Abschläge auf das errechnete Marktpotenzial vorzunehmen.

Relevante Betriebe	316
Brutto Investitionssumme (T€)	~41 084,6
• davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~17 255,5
• davon SR-Potenzial (T€)	~4 313,9
Marktpotenzial SR (Stück/Jahr; SR Systempreis T€ 704,1 / 310,2; 6 Roboterarme pro System) errechnet	36/84
Errechneter max. Bestand an Roboterarmen (5 Jahre Lebensdauer eines Systems) errechnet	180/420

Tab. 3-4.6 Ableitung des Marktpotenzials (Eigene Schätzungen)

²⁷ Soweit nicht anders vermerkt im folgenden BMELV (2010): Ertragslage Garten- und Weinbau 2010 (<http://www.bmelv-statistik.de>).

²⁸ Schätzung anhand der Quote von Maschinen- und Anlagevermögen zu gesamten Anlagevermögen je Haupterwerbsbetrieb (~ 42%).



01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die Serviceroboter-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zum konventionellen Gemüseanbau sind – selbst bei den hier angenommenen, vergleichsweise niedrigen technischen Verfügbarkeiten der Serviceroboter-Systeme (von 75%).
- Zum einen sind die Serviceroboter-Alternativen schon heute in der Lage, zu vergleichbaren oder sogar besseren Stückkosten zu produzieren. Aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive heraus sind die Serviceroboter-Alternativen sogar deutlich günstiger als die manuelle Variante, was insbesondere aus den erheblich geringeren Lohnkosten der Serviceroboter-Varianten resultiert. Hinzu kommen die kurzen Amortisationszeiträume.
- Zum anderen erscheinen die Serviceroboter-Varianten hinsichtlich sich ändernder Rahmenbedingungen robuster als die konventionelle Methode. Insbesondere, wenn man die zukünftig zu erwartenden Lohnkostensteigerungen durch die Einführung von Mindestlöhnen im Bereich der Landwirtschaft berücksichtigt, erscheinen alleine die Serviceroboter-Varianten geeignet, eine signifikante Erhöhung der Stückkosten zu vermeiden.
- Vor diesem Hintergrund kann mit einer hohen Marktakzeptanz der Serviceroboter-Lösungen gerechnet werden.

5.2 Forschungsbedarf

- Erhöhung der Zuverlässigkeit und Robustheit der Objekterkennung und -lokalisierung:
 - Im Bereich der 2-D- und 3-D-Bildverarbeitung sind für die vorgesehene Anwendung bereits Ansätze (Laborprototypen) vorhanden. Durch die große Toleranz in der Größe und Form der zu erkennenden Früchte sowie den unstrukturierten Hintergrund (Ackerboden und äußere Fruchtblätter) ist die erreichbare Zuverlässigkeit dieser Algorithmen nicht ausreichend. Gleichsam sind existierende Ansätze noch nicht ausreichend robust

gegen die im vorliegenden Anwendungsfall auftretenden Störungen (wechselnde Beleuchtung, Sensorblendung durch direkte Sonneneinstrahlung, Regen, Nebel, Staub, Verschmutzung). Bei der Lokalisierung ist auch eine enge Verzahnung mit der Greifplanung gegeben, da diese die Erkennungstoleranzen der Lokalisierung ausgleichen muss.

- Entwicklung flexibler Armbewegungs- und Greifplanung:
 - Auch hier existieren bereits erste Ansätze, die im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Robustheit weiterentwickelt werden müssen. Zusätzlich sind im vorliegenden Anwendungsfall z.B. Objekte zu unterscheiden, die ein Hindernis darstellen (Frucht) oder die „durchgriffen“ werden dürfen (Randblätter), und diese Informationen sind bei der Bewegungsplanung und der Eigen-/Fremdkollisionsvermeidung entsprechend zu berücksichtigen.
- Entwicklung leistungsstarker, kostengünstiger 3-D-Sensoren
 - Derzeitige 3-D-Sensorik basierend auf der Time-of-Flight-Technologie ermöglicht bereits Messungen mit einer Genauigkeit von ungefähr +/-1 cm, was für die Anwendung ausreichend wäre. Die hohen Kosten pro Sensor (ca. 6 Tsd Euro) stehen einem wirtschaftlichen Einsatz jedoch im Weg. Kostengünstigere Time-of-Flight-Sensoren sind zwar verfügbar, bieten jedoch nicht die benötigte Genauigkeit. Als Abhilfe ist eine Kopplung mit einem Stereo-Kamerasystem denkbar, was jedoch beim aktuellen Stand der Forschung einen erhöhten Rechen- und Hardwareaufwand nach sich zieht. Eine Entwicklung von Sensoren, die die Time-of-Flight-Technologie mit einer Stereobildverarbeitung als integriertes System verbinden, würde eine weitere wirtschaftliche Variante für dieses Szenario ermöglichen.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass der unmittelbare Forschungsbedarf für die hier dargestellten SR-Varianten auf die Bildverarbeitung und die Umsetzung der errechneten Objektpositionen in Greifvorgänge beschränkt ist. Hierbei sind bereits Ansätze vorhanden, teilweise auch in industriellem Umfeld, allerdings sind diese Ansätze bisher nicht für den Einsatzfall und die Einsatzumgebung geeignet. Weitere Entwicklungen, wie z.B. neuartige Sensoren zur Objekterkennung und -lokalisierung hätten jedoch ebenfalls positive Effekte auf die Wirtschaftlichkeit dieses Szenarios.





01

02

03



04

05

06

07

08

09

10

11

BODENFRÜCHTEERNT

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B
Hardware zur Bildverarbeitung	12 000 €	5 000 €
Kraftmessung	300 €	300 €
Roboterarm	120 000 €	120 000 €
Linearachsen	120 000 €	40 000 €
Greifer	288 000 €	60 000 €
Schnittvorrichtung	300 €	300 €
Touchscreen	1 000 €	1 000 €
Abdunklung		1 000 €
Beleuchtung		1 000 €

Tab. 3-4.7 Anschaffungskosten



SZENARIOSTECKBRIEF

BODENREINIGUNG



05



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG





BODENREINIGUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Laut VDMA-Fachverband Reinigungssysteme ist die Reinigungsmaschinenbranche in Deutschland relativ klein (verglichen mit den anderen im VDMA organisierten Branchen)¹, der Markt für Reinigungsmaschinen hingegen ist signifikant. Demnach halten die deutschen Anbieter einen Weltmarktanteil von 20%, in Europa beträgt der Anteil 48%.

Die Reinigungsverfahren lassen sich in die folgenden vier Kategorien unterteilen:

- Kehren
- Saugen
- Scheuern
- Hochdruckreinigen

Die Anwendung dieser Techniken wird innerhalb dieses Steckbriefs auf die Bodenreinigung in Gebäuden eingeschränkt. Typischerweise werden Dienstleistungen zur Unterhaltsreinigung von Facility Management-Firmen (FM) durchgeführt, die von den Immobilienbetreibern (dem Gebäudeverantwortlichen) beauftragt werden. Die FM-Firma delegiert die Reinigungsarbeiten an ihre Mitarbeiter vor Ort. Nachfolgend ist der derzeitige Ablauf der Bodenreinigung in Gebäuden beschrieben.

Bodenreinigung im Supermarkt



Abb. 3-5.1 Typisches Beispiel einer Bodenreinigung im Supermarkt, hier der Kärcher BD 60/95 RS.

Problematisch sind vor allem die objektive Beurteilung und der Nachweis der Dienstleistung.

Weiterhin sind hier kaum Synergieeffekte durch Inanspruchnahme verschiedener Dienstleistungen nutzbar, da ein Unternehmen üblicherweise ausschließlich für die Reinigungsdienstleistung beauftragt wird.

¹ Branchenporträt VDMA-Fachverband Reinigungssysteme. URL: http://www.vdma.org/wps/portal/Home/de/Branchen/IRS/Wirtschaft_und_Recht/RS_2005_02_24_PM_Art_Branche?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/vdma/Home/de/Branchen/IRS/Wirtschaft_und_Recht/RS_2005_02_24_PM_Art_Branche. Abgerufen am 29.10.2010

BODENREINIGUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Bodenreinigung

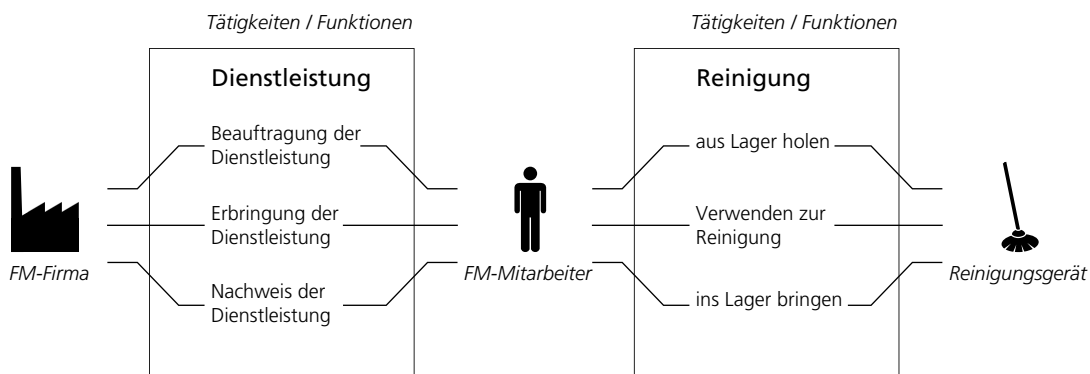


Abb. 3-5.2 Beauftragung, Durchführung und Nachweis der Dienstleistung.

Sequenzdiagramm

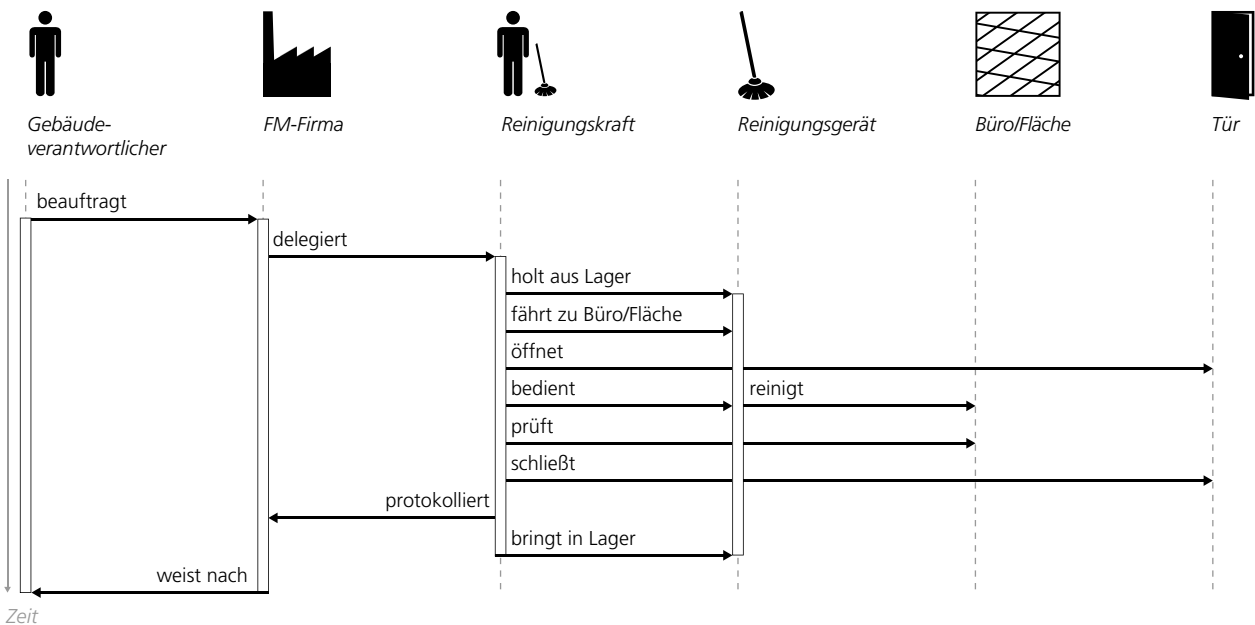


Abb. 3-5.3 Sequenzdiagramm der heutigen Bodenreinigung.



BODENREINIGUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.2 Probleme

Im Wesentlichen treten derzeit die folgenden Probleme auf, die aus Expertengesprächen zusammengetragen wurden.

- Einführung eines Mindestlohns im Bereich der Gebäudereinigung
- Heutiger Stundensatz: ca. 6 – 8 Euro Mindestlohn im Westen für 2010: 8,40 Euro, im Osten: 6,83 Euro; für 2011 im Westen: 8,55 Euro, im Osten: 7,00 Euro, also Steigerung der Lohnniveaus ab 2010. Der Einsatz von Automatisierungslösungen im Allgemeinen bzw. Robotiklösungen im Speziellen kann schneller rentabel werden.
- Im Niedriglohnsektor arbeitet überwiegend schlecht ausgebildetes Personal; deshalb muss die Roboterhandhabung sehr einfach sein.
- Problematisch sind auch die Flüchtigkeit der Dienstleistung und damit deren Nachweis. Beispielsweise kann ein Raum korrekt gereinigt worden sein, zu einem späteren Zeitpunkt aber wieder verschmutzt werden, etwa durch Unachtsamkeit von Mitarbeitern. Der Nachweis der korrekten Reinigung ist an dieser Stelle unter Umständen schwierig. Getrennte Sensorsysteme zur Qualitätssicherung werden kaum eingesetzt, da zum einen die Kosten massiv steigen und zum anderen dies zu einem zeitlichen Versatz zwischen Reinigungsdienstleistung und Qualitätsüberprüfung führt, was die Nachweisbarkeit wie bereits erläutert einschränkt. Ein Serviceroboter könnte die objektive Nachvollziehbarkeit der Durchführung, Prüfung und Dokumentation realisieren.

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Durch Kombination verschiedener Bereiche des infrastrukturellen Facility Managements können mehrere Dienstleistungen von nur einem einzigen Dienstleister angeboten werden, beispielsweise die Verknüpfung von Sicherheitsdienstleistungen mit der Bodenreinigung.

Weitere kombinierbare Funktionen in solch einem Roboter sind:

- interne Postdienste
- Umzugsdienste

- Waren- und Logistikdienste
- Versorgungs- und Entsorgungsdienste

Vorteile sind vor allem die kalkulierbare Kostenstruktur und die Nachweisbarkeit der Dienstleistung.

Trend: Paketdienstleistungen¹

Unter Paketdienstleistungen wird die Kombination verschiedener Anwendungen verstanden, die von einem Anbieter erbracht werden.

- Nur ein Ansprechpartner mit Prozess- und Betreiberverantwortung für den Gebäudeverantwortlichen
- Die Bündelung von Aktivitäten durch Serviceroboter entspricht diesem Trend.

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Untergliederung des Facility Management (FM), auch Gebäudemangement genannt – gemäß DIN 32736 (August 2000) in

- Technisches Facility Management
- Infrastrukturelles Facility Management
- Kaufmännisches Facility Management

Nur ca. 20% der Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs, LCC) eines Gebäudes fallen während der Entstehung an, die restlichen 80% während des Bestehens des Gebäudes. Da die Unterhaltskosten auch zu einem wesentlichen Anteil aus Kosten für das Facility Management bestehen, entfällt somit ein relevanter Anteil daraus auch auf das Facility Management. Für die Erbringung der Reinigungsdienstleistung lässt sich zwischen Input-orientierten Service-Levels und Output-orientierten Service-Levels unterscheiden.

- Input-orientierte Service-Level: z.B. Bestellung von 5 mal Reinigen pro Woche
- Output-orientierte Service-Level: z.B. Reinigen nach Bedarf

¹ Laut Expertenmeinung





BODENREINIGUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Problem: Die Qualität der erbrachten Dienstleistung muss nachgewiesen werden. In der aktuellen Preispolitik, wo über Ausschreibungen stets der günstigste Anbieter beauftragt wird, können Input-orientierte Service-Level beim Technischen FM kaum mit der erforderlichen Qualität durchgeführt werden.

Wichtig für den Zielmarkt ist die Zeitdauer für Amortisationen von FM-bezogenen Anschaffungen, da die FM-Branche insgesamt als investitionsarm gilt. Ein vollständiger Return-on-Invest muss üblicherweise nach ca. 3 Jahren erfolgt sein. Einige Anbieter beurteilen Investitionen auch über die gesamte Vertragslaufzeit eines betreuten Gebäudes, die zwischen einem und bis zu 10 - 15 Jahren liegen kann.² In letzterem Fall können unter Umständen auch infrastrukturelle Adaptionen (in Teppichböden eingearbeitete RFID-Tags, elektrische Türöffner, etc.) sinnvoll sein, die jedoch im Rahmen dieses Szenarios nicht weiter betrachtet werden.

1.4.2 Einsatzbereich

Betrachtet wird im Weiteren das infrastrukturelle Facility Management. Hier kommt meist die Interaktion mit der Umgebung ohne komplexe, kognitive Fähigkeiten des Menschen aus. Das infrastrukturelle FM wird üblicherweise von spezialisierten Dienstleistern durchgeführt, die sich auf einzelne Bereiche fokussiert haben.

- **Relevanter Kostentreiber: Lohnkosten**
Im Bereich Reinigung sind mehr als 80% der Kosten fix damit und nicht steuerbar.
Im Jahr 2007 beliefen sich die Personalaufwendungen von Unternehmen im Bereich Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln (ab 250 000 Euro Umsatz) auf knapp 6 Mrd Euro pro Jahr³.
- Reinigung von Büroflächen soll idealerweise außerhalb der Bürozeiten stattfinden, um die dort arbeitenden Mitarbeiter

möglichst wenig zu beeinträchtigen.

Ferner handelt es sich hier um einen Niedriglohnsektor, in dem das Personal häufig nicht über eine ausgeprägte Bildung verfügt und teilweise der deutschen Sprache nicht vollständig mächtig ist. Dies bewirkt bei manchen Firmen Vorbehalte gegenüber komplexerer Technik, die hohe Investitionskosten verursacht und unter Umständen nur von speziell geschultem Personal bedient werden kann.

² Gemäß Aussagen aus verschiedenen Expertengesprächen.

³ Quelle: Statistisches Bundesamt Deutschland, GENESIS-Online.





01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

Sequenzdiagramm

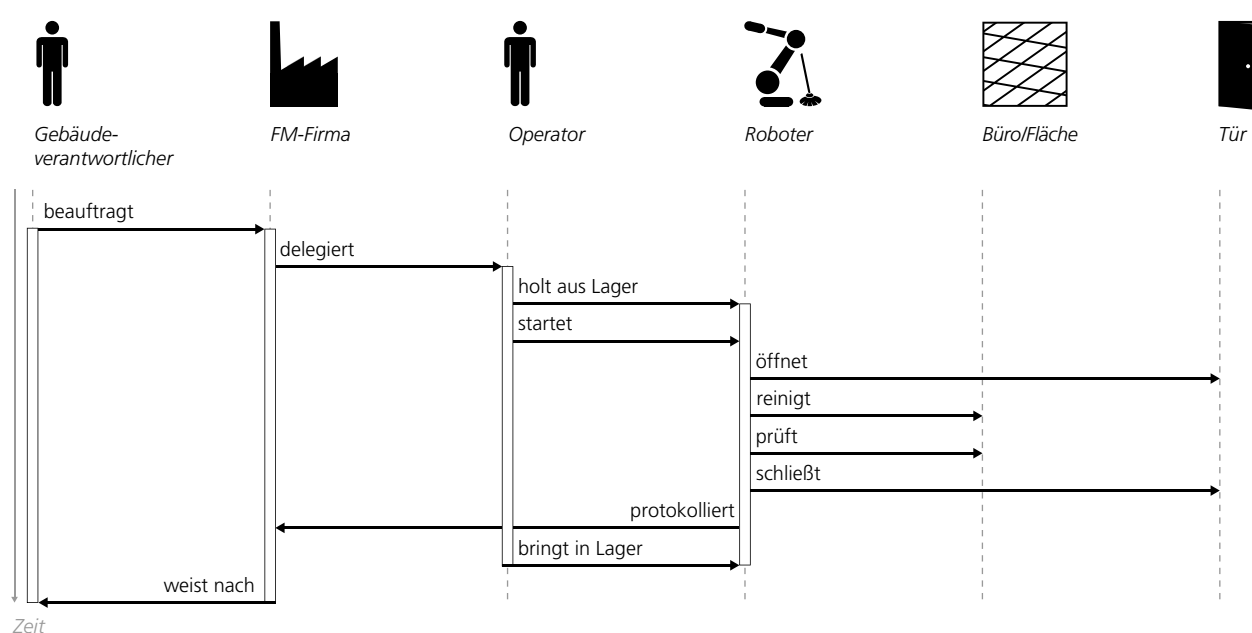


Abb. 3-5.4 Sequenzdiagramm mit der Serviceroboter-Lösung

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Der Reinigungsroboter soll selbstständig die in typischen (Büro-)Gebäuden vorkommenden Bodenbeläge reinigen, die Türen von Büros aufschließen und auf Abweichungen vom Nominalzustand (wie beispielsweise offene Fenster) reagieren. Sollte er selbst bestimmte Verschmutzungen nicht beseitigen können, so übermittelt er das Ereignis an seine Leitstelle, die beispielsweise eine gezielte Nassreinigung veranlassen kann.

- Selbstständige Bodenreinigung innerhalb von Gebäuden
- Verschiedenartige Fußbodenbeläge werden erkannt und entsprechend gereinigt (Fliesen, Teppichboden, Laminat, Beton, kunststoffversiegelter Beton, etc.)
- Roboter hat Bereiche des zu reinigenden Gebäudes eingelernt.
- Lokalisierung und autonome Navigation sind gewährleistet.
- Um dem Vergleich mit der menschlichen Putzkraft standhal-

ten zu können, sind auch gewisse kognitive Fähigkeiten zur Erkennung und Adaption an den jeweiligen Raum notwendig, was auch die Prozesssicherheit erhöht. Dazu gehören die Erkennung von verrückten Stühlen, Abfalleimern, Kabel auf dem Boden, etc.

- Ferner wird eine menschliche Reinigungskraft auch Abweichungen vom Nominalzustand wie offene Fenster, verschmierte Wände usw. erkennen und beheben oder ggf. weiterleiten. Der Reinigungsroboter soll auch über diese kognitiven Fähigkeiten verfügen.
- Um selbstständig Büros reinigen zu können, müssen verschlossene Türen autonom geöffnet werden können.

2.2 Roboterentwurf

Das Serviceroboter-System basiert auf einer autonom navigierenden mobilen Roboterplattform, die zur Gewährleistung



01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

der kognitiven Fähigkeiten mit Sensorik und Rechenleistung verstärkt wird. Das Reinigungsmodul beinhaltet eine Reinigungstechnik, die auf einen bestimmten Bodenbelag abgestimmt ist. Andere Bodenbeläge werden mit austauschbaren Reinigungsmodulen gereinigt. Folgende Reinigungstechniken sollen betrachtet werden:

- Saugen
- Nass abziehen
- Imprägnieren

Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten in ihrer Grundfunktion erläutert:

- Das innere Modul, das die Reinigungstechnik selbst enthält, kann manuell entnommen werden, um neues Reinigungsmittel aufzufüllen, Schmutzwasser zu entnehmen, und kann durch alternative Reinigungsmodulen mit anderen Reinigungstechniken ersetzt werden.
- Eine kleine Reinigungseinheit kann durch den Roboterarm frei um den Roboter selbst geführt werden, um auch die Reinigung von Ecken und kleineren Zwischenräumen zu ermöglichen.
- Darüber hinaus können bewegliche Gegenstände wie Abfalleimer verschoben werden, um den darunterliegenden Boden ebenso reinigen zu können. Der Roboter muss selbst auf Basis von a-priori Wissen entscheiden, welche Gegenstände er verschieben darf und welche nicht bewegt werden dürfen.
- Das Öffnen von Türen erfolgt mit dem Roboterarm, der in der Lage ist, eine Tür mit Hilfe des zugehörigen Schlüssels zu öffnen. Somit sind keine Änderungen an der Infrastruktur erforderlich.

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Ein Konzept mit notwendigen Hardwarekomponenten des kognitiven Reinigungsroboters wird im Folgenden beschrieben.

- Mobile Plattform mit Roboterarm und integrierter, austauschbarer Reinigungseinheit.
- Eigenständige Navigation im Gebäude und selbstständiges Türöffnen und -schließen.

Roboterentwurf



Abb. 3-5.5 Entwurf eines autonomen Reinigungsroboters.

- Automatische Detektion des Bodenbelags und dadurch Selektion des Reinigungsverfahrens.
- Sichere Navigation: Keine Beschädigung der Umgebung und Kollisionsfreiheit mit dem Menschen.

Diese Komponenten gehen aus den folgenden Anforderungen hervor und werden nachstehend detailliert beschrieben.



BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

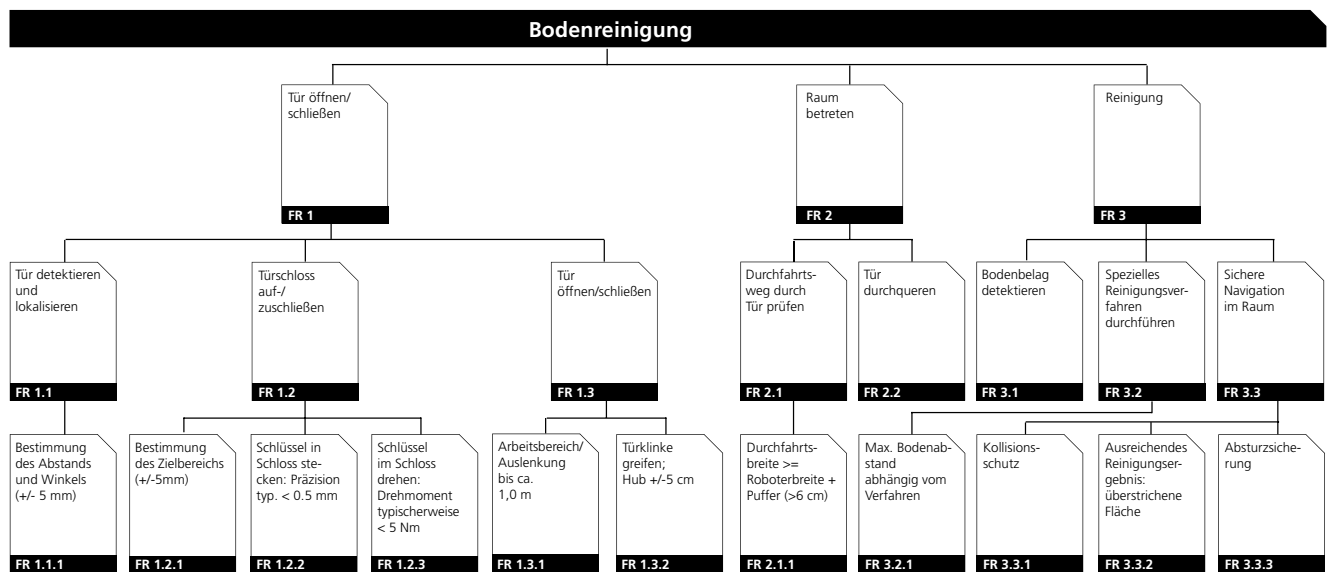


Abb. 3-5.6 Axiomatic Design – Functional Requirements.

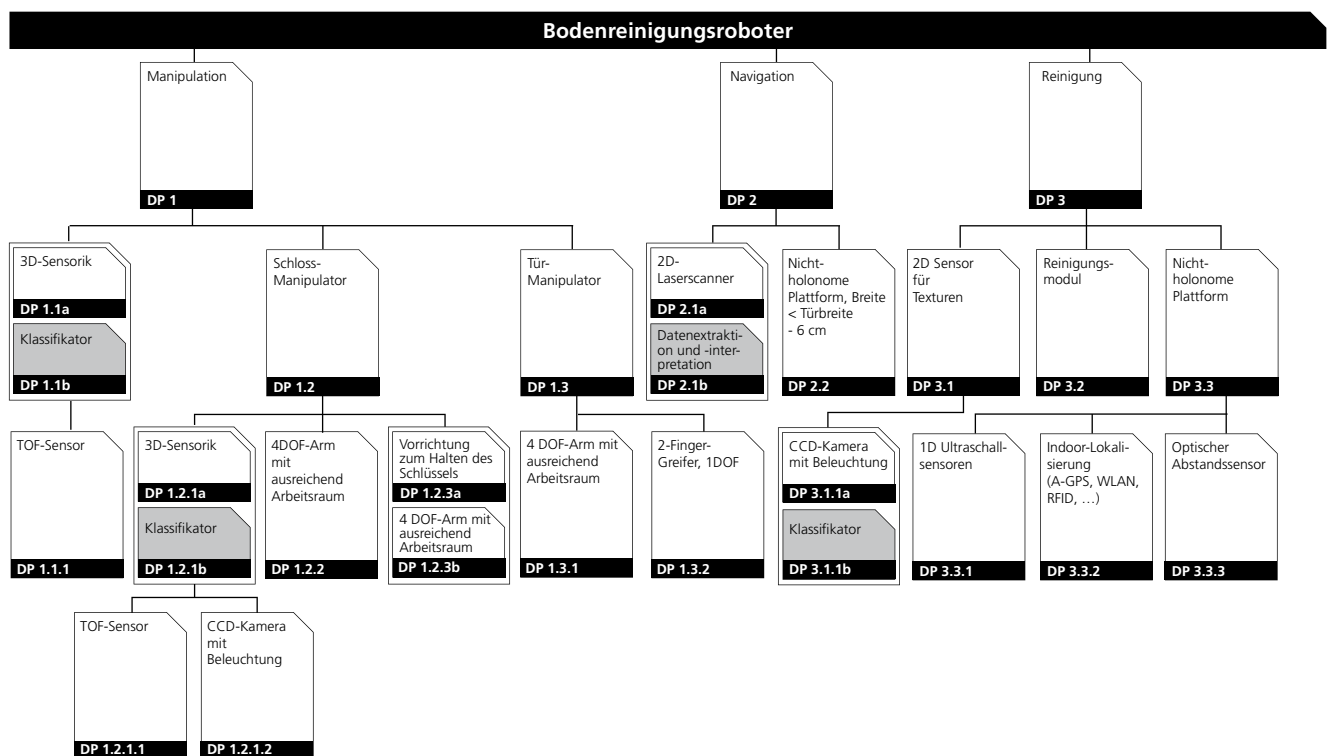


Abb. 3-5.7 Axiomatic Design – Design Parameters.



01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 02 SYSTEMKONZEPTE

Die kritischen Hardwarekomponenten, die für die Umsetzung des Szenarios unerlässlich sind, werden im Folgenden aufgeführt. Für die Funktion des Türöffnens und des Bewegens einer externen Reinigungseinheit wird ein Roboterarm benötigt. Eine kurze Übersichtsrechnung zeigt, dass 4 Freiheitsgrade dafür prinzipiell ausreichen.

TRL/€/FR-Diagramm

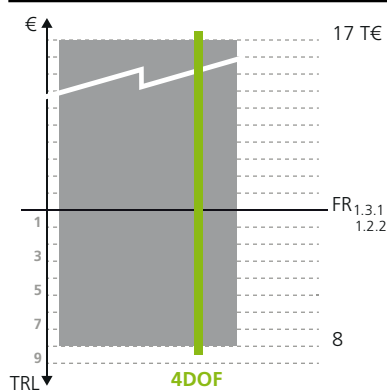


Abb. 3-5.8 4-DOF-Arm mit ausreichend Arbeitsraum (z.B. Universal Robots UR-6-85-5-A, 6 DOF).

Entsprechende Roboterarme sind am Markt verfügbar. Da die gängigen Roboterarme über 6 Freiheitsgrade verfügen, wird eine gewisse Redundanz bei der Positionierung der mobilen Plattform ermöglicht.

Die Vorrichtung zum Halten des Schlüssels und zum Öffnen der Türklinke kann durch einen Zweifingergreifer umgesetzt werden. Greifer dieser Leistungsklasse sind von verschiedenen Herstellern mit den entsprechenden Schnittstellen für Roboterarme verfügbar. Gegebenenfalls sind die Backen gemäß den Anforderungen anzupassen. Einige Greifsysteme verfügen bereits über integrierte Sensorik, was hier im Preis bereits berücksichtigt wurde. Die Funktion des Greifens der Türklinke bzw. des Schlüsseldrehens ergibt sich aus der Kombination des 1-DOF-Greifers mit dem Leichtbauroboterarm.

TRL/€/FR-Diagramm

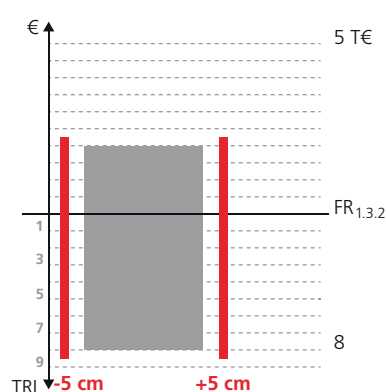


Abb. 3-5.9 2-Finger-Greifer, 1 DOF (ggf. integrierte Kamera).

Ein Reinigungsmodul verfügt über eine Reinigungstechnik für einen spezifischen Untergrund wie Teppichboden, Fliesen, Laminat usw. Zum Abdecken verschiedener Untergründe kann die Reinigungseinheit gegen eine Einheit mit einem anderen Reinigungsverfahren gewechselt werden. Die einzelnen Reinigungstechnologien werden bereits industriell eingesetzt, universelle Reinigungsmodule sind bestenfalls als Proof-of-Concept verfügbar, da verschiedene Bodentypen wie Betonboden, Teppich(-boden), Parkett, Laminat, Fliesen, usw. verschieden behandelt werden müssen. Aus diesem Grund werden getrennte Reinigungsmodul für die verschiedenen Techniken angestrebt. Der Knackpunkt ist die Integration der Reinigungsverfahren in kompakte Module mit möglichst langer Laufzeit unter zu minimierendem Ressourcenverbrauch (Energie, Verbrauchsmaterial).



BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

TRL/€/FR-Diagramm

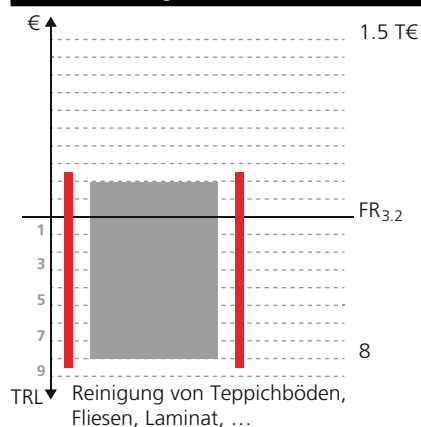


Abb. 3-5.10 Reinigungsmodul für spezifische Böden

Es sind verschiedene Konzepte für die Indoor-Lokalisierung verfügbar. Prinzipiell genügt eine Groblokalisierung als erster Schritt, die den Raum identifiziert. Dies ist beispielsweise mittels WLAN⁴, Assisted GPS⁵, ISO/IEC 24730-2 Real Time

TRL/€/FR-Diagramm

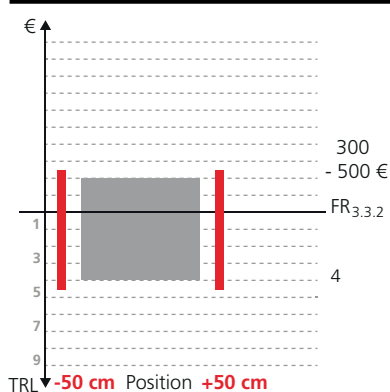


Abb. 3-5.11 Indoor-Groblokalisierung (verschiedene Verfahren sind verfügbar, jedoch bisher nicht mit Servicerobotern eingesetzt). Beispiele: Assisted GPS, RFID; WLAN etc.

4 Ekahau Europe, Hiilikatu 3, 00180 Helsinki, Finland, <http://www.ekahau.com/products/real-time-location-system/overview.html>

5 NavSync Headquarters, Bay 143, Shannon Industrial Estate, Shannon, County Clare, Ireland, http://www.navsync.com/Assisted_GPS_tech.html

Locating Systems⁶ oder RFID-Tags⁷ möglich. Allen Konzepten ist gemeinsam, dass Sende-Empfangsmodule installiert und vermessen werden müssen, um eine Zuordnung von Feldstärken oder Laufzeiten auf Koordinaten vornehmen zu können. Die Frage, wie zuverlässig diese Systeme im Serviceroboterumfeld agieren, bleibt durch experimentelle Tests zu belegen.

Mobile Plattformen werden von verschiedenen Herstellern angeboten, jedoch ist der industrielle Einsatz im 24/7-Betrieb nur bedingt nachgewiesen. Werden stattdessen Systeme aus dem FTS-Bereich verwendet, so geht die erhöhte Zuverlässigkeit mit einer Reduktion der Funktionalität und Flexibilität einher.

TRL/€/FR-Diagramm

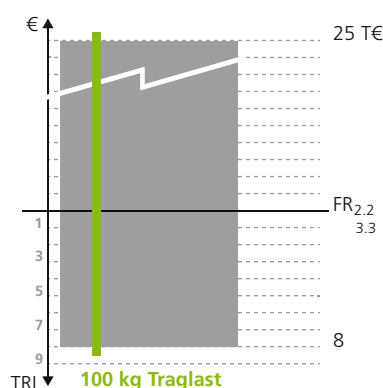


Abb. 3-5.12 Mobile Plattform (ohne externe Sensoren, Differential-Antrieb).

Die Kosten einer off-the-shelf beziehbaren mobilen Plattform wurden um 5 000 Euro reduziert, da diese Systeme üblicherweise Sensorik (wie beispielsweise Laserscanner) enthalten, die hier einzeln aufgeschlüsselt sind.

6 Zebra Enterprise Solutions, Rossfelder Str. 65/5, 74564 Crailsheim, <http://zes.zebra.com/technologies/location/iso-iec-24730-2.jsp>

7 Radianse, Inc., 200 Brickstone Square, Suite 302, Andover, MA 01810, USA, <http://www.radianse.com/asset-tracking.html>





01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.2 Software

- Tür detektieren: Objektidentifikation und -klassifikation
 - Hohe Performanz bei hoher Zuverlässigkeit
 - Zum Teil Eigenentwicklung notwendig
 - Robustheit gegenüber verschiedenen Objekten (hinsichtlich Größe, Form, Textur, Abstand, etc.)
 - Robustheit gegenüber unterschiedlichen Umgebungslichteinflüssen
 - Robustheit gegenüber verschiedenen Sensorpositionen (Abstand, Winkel, Höhe, etc.)
 - Ausführung idealerweise unter weichen Echtzeitbedingungen
- Schlüssel in Türschloss stecken
 - Hohe Präzision bei statistischer Unsicherheit, Visual Servoing
 - Eigenentwicklung für die Integration der Anwendung notwendig, die meisten Grundfunktionen sind verfügbar
 - Dynamisch zu erkennende Beschränkung des Bewegungsraums
 - Robustheit gegenüber Umgebungseinflüssen (Beleuchtung, Rauschen in den Sensordaten, etc.)
 - Regelkreis zum Abgleich der Sensordaten mit den Aktorbefehlen, um die Präzision beim Schlüssein führen zu erreichen; Leichtbauroboterarme verfügen prinzipbedingt nicht über die ausreichende Präzision und Wiederholgenauigkeit
- Tür öffnen
 - Synchrone Arm-/Plattform-Bewegung durch limitierten Arbeitsraum
 - Noch Eigenentwicklung nötig für anwendungsbezogene „Middleware“ und Applikation an sich, einige Funktionen bereits vorhanden
 - Da der Arbeitsraum von Leichtbauroboterarmen üblicherweise zu klein ist, um eine Tür zu öffnen, muss die mobile Plattform synchron zur Armbewegung bewegt werden. Hierzu gibt es erste Ansätze (z.B. ROS), jedoch ist die Robustheit gegenüber Sensorrauschen, Ungenauigkeiten usw. sowie die Performanz nicht ausreichend.
- Harte Echtzeit für die Synchronisation von mobiler Plattform und Leichtbauroboterarm notwendig; Alternative: Steuerung für eine kinematische Kette, bestehend aus mobiler Plattform und Leichtbauroboterarm
- Bodenbelag detektieren: Texturklassifikation
 - hohe Zuverlässigkeit
 - Anwendungsbezogene Eigenentwicklung notwendig, viele Grundfunktionen verfügbar
 - Integration der Texturklassifikation auf diesen Anwendungsfall
 - Robustheit gegenüber Verschmutzung des Bodenbelags, unterschiedliche Lichtverhältnisse, etc.
 - Zuverlässigkeit muss gegeben sein; fehlerhafte Klassifikation führt zur Auswahl eines falschen Reinigungsverfahrens, das den Bodenbelag unter Umständen zerstören kann.
 - Idealerweise Laufzeit der Algorithmen in weicher Echtzeit
- Kollisionsvermeidung bei Navigation im Raum
 - Vermeidung unterschiedlichster Hindernisse, roboterfeindliche Umgebung; dennoch Verschieben bestimmter Hindernisse wie Abfalleimer etc.
 - Anwendungsbezogene Eigenentwicklung nötig
 - Identifikation von Objekten
 - Klassifikation von Objekten
 - Zuverlässiges Erkennen der Hindernisse (verschiedene Höhen, Größen, Materialien, etc.) durch Sensoren
 - Kompensation von Unsicherheit in den Sensordaten
 - Idealerweise Laufzeit der Algorithmen in weicher Echtzeit
- Überstreichen der maximalen Fläche bei Navigation im Raum
 - Entscheiden, welche Hindernisse verschoben werden dürfen
 - Bahnplanung in unbekannter Umgebung mittels VSLAM
 - Einige Eigenentwicklung nötig, Grundalgorithmen bereits vorhanden
 - Objekterkennung im Gegensatz zu Hindernisdetektion
 - Objektklassifikation
 - Kontextsensitive Handlungsplanung für detektierte Objekte
 - VSLAM





01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.1.1 Bestimmung des Abstands und Winkels	±5 mm	DP 1.1.1 TOF-Sensor	6 000 €	5	2	Auflösung der Sensorik zu niedrig zur robusten Objekterkennung
		DP 1.1b Klassifikator				Robustheit gegenüber Lichtverhältnissen und Größen-, Form- und Farbabweichungen von Objekten sowie gegenüber Unsicherheiten und Rauschen in den Sensordaten
FR 1.2.1 Bestimmung des Zielbereichs zum Schlüssel stecken	Region of Interest ≈10 x 10 cm ²	DP 1.2.1.1 TOF-Sensor	6 000 €	5	2	Auflösung der Sensorik zu niedrig zur robusten Objekterkennung
		DP 1.2.1.2 CCD-Kamera mit Beleuchtung	500 €	9	2	
		DP 1.2.1b Klassifikator		5	2	Robustheit gegenüber Lichtverhältnissen und Größen-, Form- und Farbabweichungen von Objekten sowie gegenüber Unsicherheiten und Rauschen in den Sensordaten
FR 1.2.2 Schlüssel in Schloss stecken	Typ. < 0,5 mm, Winkelauflösung < 0,5°	DP 1.2.2 4DOF-Arm	17 000 €	8	2	Kosten
FR 1.2.3 Schlüssel im Schloss drehen	Drehmoment typ. < 5 Nm	DP 1.2.3 Vorrichtung zum Halten des Schlüssels, z.B. 2-Finger-Greifer, 1DOF	5 000 €	8	2	
FR 1.3.1 Arbeitsbereich/Auslenkung des Roboterarms	Ca. 1 m	DP 1.3.1 4DOF-Arm	17 000 €	8	2	Kosten
FR 1.3.2 Türklinke greifen	Hub ±5 cm	DP 1.3.2 2-Finger-Greifer, 1 DOF	5 000 €	9	2	Kosten
FR 2.1.1 Durchfahrtsbreite	>(Roboterbreite + 6 cm Puffer)	DP 2.1a 2D-Laserscanner	3 000 €	9	2	Kosten
		DP 2.1b Datenextraktion und -interpretation		8	2	Robustheit gegenüber Größen- und Formabweichungen von Objekten sowie gegenüber Unsicherheiten und Rauschen in den Sensordaten
FR 2.2 Tür durchqueren		DP 2.2 Nicht-holonome Plattform	25 000 €	8	2	Kosten
FR 3.1 Bodenbelag detektieren		DP 3.1.1a CCD-Kamera mit Beleuchtung	500 €	9	2	
		DP 3.1.1b Klassifikator		5	2	Robustheit gegenüber Lichtverhältnissen und Größen-, Form- und Farbabweichungen von Objekten sowie gegenüber Unsicherheiten und Rauschen in den Sensordaten

**BODENREINIGUNG**

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 3.2.1 Max. Bodenabstand	Abhängig vom Reinigungsverfahren, typ. <1 cm	Reinigungsmodul DP3.2	1 500 €	8	2	Miniaturisierung und Integration der Reinigungstechnik; bisherige Reinigungssysteme sind entweder größer oder reduziert in der Laufzeit
FR 3.3.1 Kollisionsschutz	Binär: Kollision muss vermieden werden	DP 3.3.1 1D-Ultraschallsensoren	2 400 €	8	1	Annahme: 6 Sensoren
FR 3.3.2 Ausreichendes Reinigungsergebnis	Überstrichene/erreichbare Fläche <90%	DP 3.3.2 Indoor-Lokalisierung	500 €	8	1	Verlässlichkeit, Ausfallsicherheit, Robustheit gegen Störeinflüsse wie Funkschatten usw.
FR 3.3.3 Absturzversicherung an Absätzen/Treppen	Binär: Absturz muss vermieden werden	DP 3.3.3 Optischer Abstandssensor	500 €	8	1	

SR-Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 4.1 Umgebungserkennung	Erfassung aller relevanten Features	DP 4.1a CCD-Kamera	500 €	9	2	
		DP 4.1b Feature-Extraktion		4	2	Robustheit, Geschwindigkeit bei hoher Komplexität
FR 4.2 Navigieren in unbekanntem Umgebungen		DP 4.2 VSLAM		6	2	Robustheit gegenüber Lichteinflüssen, Geschwindigkeit bei hoher Komplexität (d.h. große Räume)
FR 5.1 Beurteilung der Umgebung nach Abweichungen		DP 5.1a Interpretation der Umgebung		4	1	Robustheit gegenüber Lichteinflüssen, Geschwindigkeit bei hoher Komplexität (d.h. große Räume), Objekterkennung und -klassifikation
		DP 5.1b CCD-Kamera	500 €	9	1	
FR 6.1 Erkennen der Situation		DP 6.1a CCD-Kamera	500 €	9	1	
		DP 6.1b TOF-Sensor	5 000 €	5	1	Auflösung
		DP 6.1c Interpretation der Umgebung		4	1	Robustheit gegenüber Lichteinflüssen, Geschwindigkeit bei hoher Komplexität (d.h. große Räume), Objekterkennung und -klassifikation
FR 6.2 Bedarfsgerechtes Anpassen des Verhaltens		DP 6.2 Holonome Plattform	50 000 €	6	2	Verlässlichkeit der Navigation durch die große Zahl an DOF
FR 6.3 Anfahren der Zielobjekte		DP 6.3 6 DOF-Arm	17 000 €	8	2	
FR 6.4 Manipulation der Zielobjekte		DP 6.4 3-Finger-Hand	48 000 €	6	2	Kosten, mechanische Zuverlässigkeit

Tab.3-5.1 Komponentenübersicht



01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

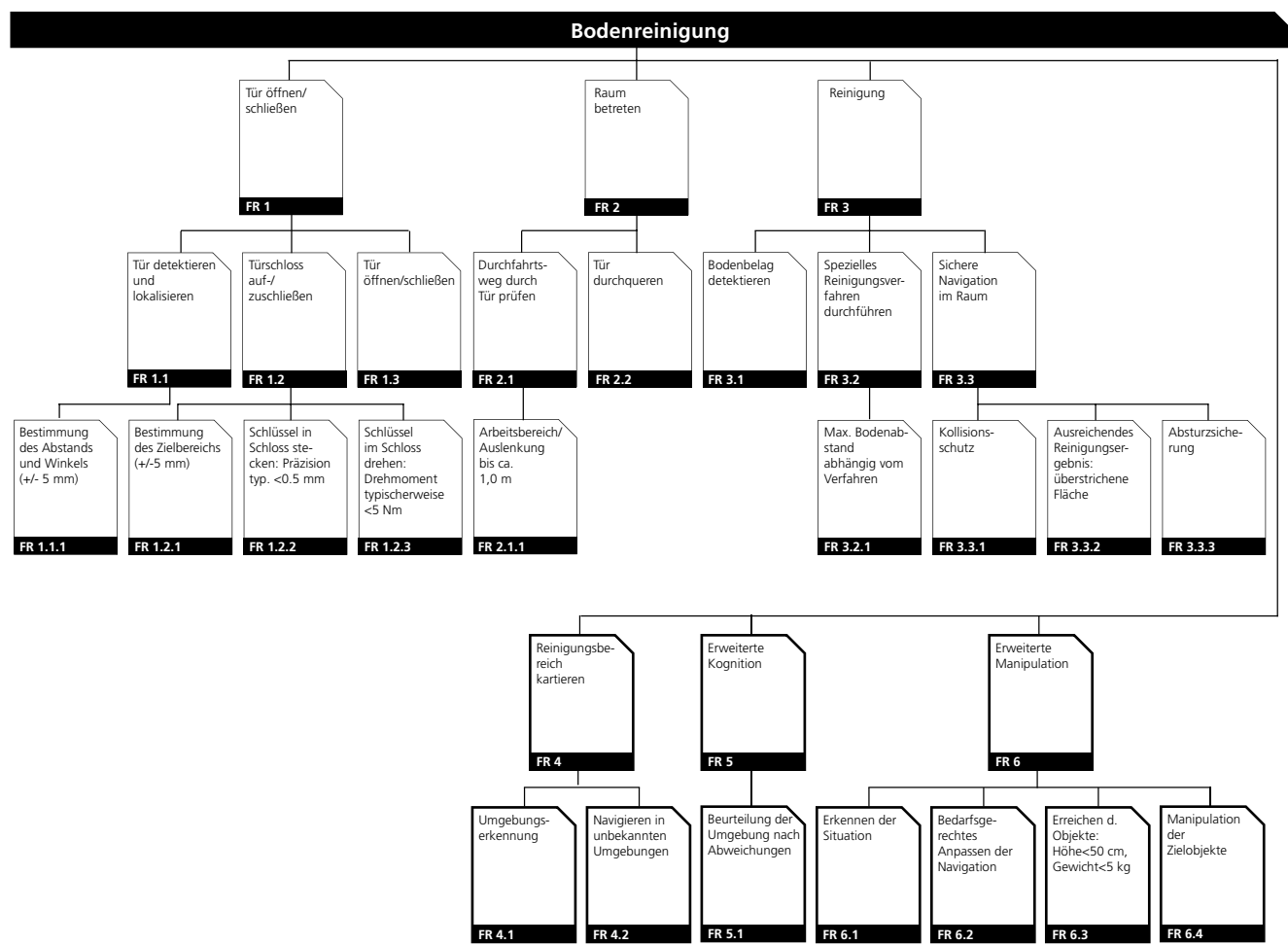


Abb. 3-5.13 Axiomatic Design der SR-Variante B – Functional Requirements.

2.2.3 Varianten

Eine komplexere Variante (SR-Variante B) des kognitiven Reinigungsroboters verfügt über eine holonome Plattform, um omnidirektionale Bewegungen ausführen zu können. Das bietet Vorteile bei der Positionierung der Plattform, da keine Rangierbewegungen wie beispielsweise mit differentiellen Antrieben ausgeführt werden müssen. Stattdessen findet eine Seitwärtsbewegung statt. Auch das Reinigungssystem muss auf omnidirektionale Bewegungen eingerichtet sein. Als Konsequenz lässt sich die Flächenleistung erhöhen.

Die Lokalisierung erfolgt nicht mehr über ein globales Referenzierungssystem wie Assisted GPS, sondern mittels kameragebundenem Lernen⁸ (VSLAM) wird der Roboter einmal von einem Mitarbeiter „geführt“. Dabei werden optische Informationen zu einer Karte zusammengeführt, anhand derer der Roboter in späteren Läufen navigiert.

⁸ Vgl. beispielsweise Royer, E.; Lhuillier, M.; Dhome, M.; Chateau, T.: Localization in Urban Environments: Monocular Vision Compared to a Differential GPS Sensor. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 114–121, 2005 IEEE CVPR'05 – Volume 2, 2005

BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

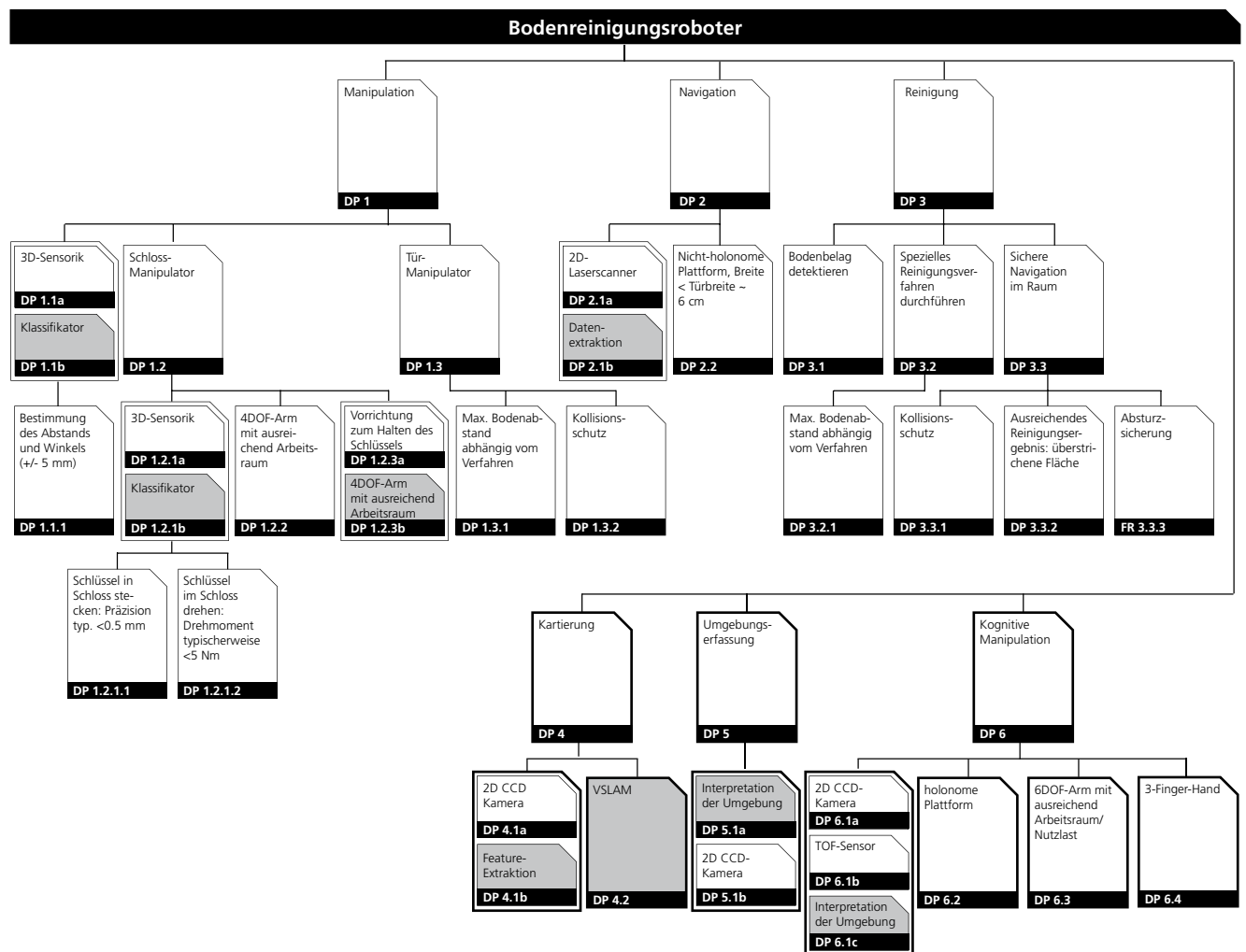


Abb.3-5.14 Axiomatic Design der SR-Variante B – Design Parameters.



01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

TRL/€/FR-Diagramm

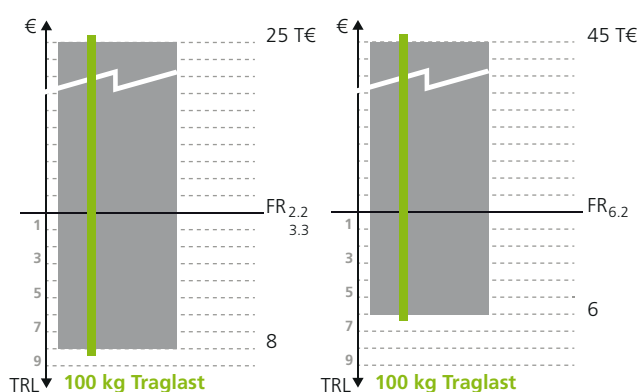


Abb. 3-5.15 Mobile Plattform (ohne externe Sensoren, links: nicht-holonome Plattform, rechts: Omnidirektional-Antrieb).

Ein erweiterter Roboterarm ist in der Lage, beispielsweise Stühle auf die Seite zu schieben und so einen größeren Bereich sicher zu reinigen. Dazu gehören auch ein entsprechend flexibles Greifwerkzeug sowie eine korrekte und zuverlässige Beurteilung der Situation.

Erweiterte kognitive Fähigkeiten erlauben es dem Roboter, die Umgebung allgemeiner zu betrachten und Abweichungen vom Nominalzustand (wie beispielsweise verschmierte Wände, offenstehende Fenster oder überquellende Abfalleimer) zu detektieren. Diese Information kann an einen Leitstand weitergeleitet werden, solange der Roboter selbst nicht in der Lage ist, für Abhilfe zu sorgen. Dies basiert auf dem Wahrnehmungsmodul „Exploration“.

Die Functional Requirements und die Design Parameters dieser Variante sind in den beiden Abbildungen 3-5.13 und 3-5.14 dargestellt.

Die nicht-holonome Plattform kann durch eine holonome Plattform ersetzt werden, was zusätzliche Freiheitsgrade bringt. Jedoch müssen Anbauten und integrierte Software darauf angepasst sein.

Auch hier wurden die Kosten um 5 000 Euro reduziert, da Teile der Sensorik hier einzeln aufgeschlüsselt sind.

i



BODENREINIGUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		manuelle Alternative		
Grunddaten Use Case							
• Lebensdauer (a)		7		7		7	
• Anzahl Roboter (SR-System)		1		1		-	
• Eff. Produktivzeit (h/a)		1 560		1 560		2 080	
• Personalstunden (h/a)		0		0		2 080	
• Serviceleistung (h/a)		1 560		1 560		2 080	
LCC-Summe (T€)		234,9	100%	330,6	100%	220,4	100%
• Investition		93,5	39,8%	163,0	49,3%	1,0	0,4%
• Installationskosten		4,0	1,7%	5,6	1,7%	0,0	0,0%
• Aktivitätskosten		76,7	32,7%	76,9	23,3%	219,0	99,4%
• Wartung/Instandhaltung		60,7	25,8%	85,1	25,7%	0,4	0,2%
• Andere		-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)		-193,0		-281,3		-153,6	
Softwarekosten (T€)		14 426,4		16 187,6		-	
Leistungskosten (€/h)		21,51		30,27		15,13	

Tab. 3-5.2 LCC.

Erläuterung zu Tab. 3-5.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tab. 3-5.2. ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Systems ausgegangen (werktags, 260 Tage). Das Serviceroboter-System wird in einem Zweischicht-Modell bei 4 h Schichtdauer eingesetzt (morgens/abends) – zum Betrieb ist keine weitere Person notwendig. Es wird angenommen, dass der Roboter in diesem Schichtmodell nur ein Gebäude bedient. Die Verfügbarkeit des Systems wird mit 75% angesetzt (technischer Ausfall), so dass die effektive Produktivzeit 1 560 h/a beträgt.

SR-Variante B: Keine Änderungen.

Manuelle Alternative: In der manuellen Alternative wird pro Schicht eine Person benötigt (Annahme: gleiche nominale Reinigungsleistung). Aufgrund der manuellen Erbringung wird eine „Verfügbarkeit“ von 100% angesetzt, so dass sich die effektive Produktivzeit entsprechend erhöht.

Investition: Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (71,9 Tsd Euro pro Roboter) – hinzu kommt ein 30%iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

SR-Variante B: Aufgrund der technischen geänderten Konfiguration ist die Summe der Komponentenkosten höher als in der SR-Variante A. Ansonsten keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Ein konventionelles Reinigungsgerät wird mit 1,0 Tsd Euro angesetzt.

Installationskosten: Für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Systems wird ein externer Personalaufwand von 5 PT (40 Ph) pro Gebäude (hier 1) benötigt. Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen (100 Euro/Ph). Es ist keine Schulung des Bediener-Personals notwendig.

SR-Variante B: Für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Systems wird ein externer Personalaufwand von 7 PT (56 Ph) pro Gebäude (hier 1) benötigt. Ansonsten keine Änderung.

Manuelle Alternative: Keine Aufwände.



BODENREINIGUNG

→ 03 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

Aktivitätskosten: Während der Produktivzeit fallen keine Personalkosten an. Der Energieverbrauch beträgt 0,765 kW pro Roboter während der Produktivzeit (1 193,4 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt.

Weitere Betreuungskosten: a) Reinigen/Bestücken der Geräte: wird in den Nebenzeiten durch gering qualifiziertes Personal durchgeführt (Mindestlohn 10 Euro/h + 50% Lohnnebenkosten; ~ 15 Minuten pro Schicht). b) Technische Betreuung: Wird ebenfalls in den Nebenzeiten durch höher qualifiziertes Personal durchgeführt (34 Euro/h; 30 Minuten/Schicht).

SR-Variante B: Der Energieverbrauch beträgt 0,9 kW pro Roboter während der Produktivzeit (1 404 kWh/a). Ansonsten keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Es fallen nur Personalkosten an (niedrig-qualifiziertes Personal; Mindestlohn 10 Euro/h + 50% Personalnebenkosten). Für die konventionellen Reinigungsgeräte fällt ein Energieverbrauch 0,3 kW an (624 kWh/a). Betreuungskosten fallen nur beim Reinigen/Bestücken der konventionellen Reinigungsgeräte an. Ansonsten keine Änderungen.

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die technische Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt (100 Euro/h) – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

SR-Variante B: Keine Änderung.

Manuelle Alternative: Keine Aufwände

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik (s. [Kapitel 2.3.1.2](#)) Abschätzung von Softwareentwicklungskosten) 14 426 Tsd Euro für SR-Variante A bzw. 16 188 Tsd Euro für die SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

- Beim Serviceroboter-Anwendungsfall handelt es sich um eine 100%ige Automatisierungslösung im Vergleich zur manuellen Alternative, bei der die menschliche Arbeitsleistung durch die Serviceroboter-Varianten während der

Produktivzeit des Systems vollständig substituiert wird. Es wird davon ausgegangen, dass das System vollausgelastet ist. Aufgrund der geringeren Verfügbarkeit steht dem Reinigungsunternehmen in der Serviceroboter-Variante eine Reinigungsleistung von nur 1 560 h/a zur Verfügung (manuelle Alternative: 2 080 h/a)

- **Kostenstruktur:** In allen Serviceroboter-Varianten (A/B) machen die Investitionsaufwendungen mit 39,8% bzw. 49,3% den größten Teil der Lebenszykluskosten aus. Während jedoch in der Serviceroboter-Variante A die Aktivitätskosten den zweitgrößten Block ausmachen (32,7% vs. 23,3%), so sind dies in Serviceroboter-Variante B die Wartungs- und Instandhaltungskosten (25,8% vs. 25,7%). Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit können somit Skaleneffekte einen relevanten Hebel darstellen.
- **Wirtschaftlichkeit:** Die Serviceroboter-Varianten sind im gegebenen Szenario noch deutlich teurer als die manuelle Alternative – sowohl im Rahmen der (relevanten) Leistungskosten: 21,51 bzw. 30,27 Euro/h vs. 15,13 Euro/h als auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF (Tsd Euro -193,0 vs. -281,3).⁹ Dass die tatsächlichen Lohnkosten in der manuellen Alternative mit 15,13 Euro/h über den angenommenen Lohnkosten von 15 Euro/h liegen ist in den Kosten für Energie sowie den Geräteabschreibungen begründet. Bezüglich der laufenden Kosten führt Serviceroboter-Variante A bzw. B im Vergleich zur manuellen Alternative zu einer Ersparnis von 27,2 Euro bzw. 2,6 Tsd Euro, so dass eine Amortisation der Investition nicht möglich ist.¹⁰

⁹ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

¹⁰ Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante A = $(0,75 \cdot 219 + 0,4) - (76,7 + 60,7) = 26,85 \ll (93,5 + 4,0)$. Die Amortisationsrechnung bedingt eine Angleichung des Leistungsvolumens aller zu vergleichenden Alternativen. Daher müssen die Kosten der manuellen Alternative entsprechend der geringeren Leistungsmenge der SR-Variante angepasst werden (es fallen nur Aktivitätskosten an – diese verhalten sich proportional zur Leistungsmenge; $1\ 560 / 2\ 080 = 0,75$).





01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

- **Sensitivität:** Aufgrund der Kostenstruktur sowie der unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Verfügbarkeit kommen als für eine Sensitivitätsanalyse relevante Parameter insbesondere die „Verfügbarkeit“ des Serviceroboter-Systems, die Anschaffungskosten sowie die Lohnkosten in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Szenarien ähnlich und proportional oder sind im Vergleich zur Gewichtung bzgl. der Aktivitätskosten irrelevant):
 - Bei gleicher Verfügbarkeit der Serviceroboter-Systeme im Vergleich zur manuellen Alternative (100%) reduzieren sich die Stückkosten auf 16,16 bzw. 22,74 Euro/h – Serviceroboter-Variante A hätte damit einen vergleichbaren Kostensatz wie die manuelle Alternative.
 - Das vorliegende Szenario wurde unter der Annahme eines Mindestlohns von 15 Euro/h (10 Euro/h +50% Nebenkosten) gerechnet. Bei niedrigeren Lohnkostensteigerungen bleibt die manuelle Alternative entsprechend günstiger.
 - Nimmt man an, dass sich die Anschaffungskosten im Sinne der Anfangsinvestition halbieren, so würden sich für Serviceroboter-Variante A unter sonst gleichen Annahmen Leistungskosten von 15,73 Euro/h ergeben - eine Amortisation der Investition innerhalb der Lebensdauer wäre aber auch hier nicht möglich.

3.2 Nutzwert

- Nachvollziehbarer Nachweis für den Kunden (Vertrauensbildung)
- Objektive Beurteilung durch Maschinen (reduziert Interpretationsspielraum auf Auftraggeber- und -nehmerseite)
- Reduzierung des Personals in sensiblen Bereichen (z.B. müssen wichtige Unterlagen nicht zwingend weggeschlossen werden)





01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceorbiter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“

Statistisch wird der Bereich „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ (WZ 74.7) den „sonstigen Unternehmensnahen Dienstleistungen“ (WZ 74) zugeordnet.¹¹ Wesentliche Strukturdaten sind in Tab. 3-5.3 zusammengefasst. 2007 zählte der Bereich „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ fast 23 000 Unternehmen, von denen allerdings mehr als 80% weniger als 20 Mitarbeiter hatten. Insgesamt erwirtschafteten sie einen Umsatz von 13 188,9 Mio Euro und investierten 267,5 Mio Euro.

	Σ	1 – 19	20 – 49	50 – 249	ab 250
Unternehmen	22 988	18 683	1 795	1 900	610
Beschäftigte	808 365				
Umsatz (Mio €)	13 188,9	2 519,5	926,5	2 942,5	6 800,4
Investitionen* (Mio €)	267,5	97,3	29,5	58,0	82,7
Investitionen je Unternehmen** (T€)	187,6	5,2	16,4	30,5	135,5
Aufwand*** (Mio €)	11 334,8				

* Für Deutschland existieren keine nach Größenklassen differenzierten Daten zu den Investitionen. Da diese jedoch im europäischen Vergleich existieren, können diese abgeschätzt werden – hier auf Basis des Durchschnitts von Frankreich, Italien und dem Vereinigten Königreich. Europäisches Statistik Amt (2010).

** Geschätzt. Siehe oben.

*** Statistisches Bundesamt (2010): Statistisches Jahrbuch 2010.

(www.destatis.de)

Tab. 3-5.3 Strukturdaten „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ (WZ 74.7) 2007¹², gegliedert nach der Anzahl der Mitarbeiter.

Lage:

Der Bundesinnungsverband des Gebäudereiniger-Handwerks beurteilt das weitere Wachstumspotenzial in vielen Bereichen des Reinigungsmarkts – insbesondere bei gewerblichen Großkunden – als nahezu ausgereizt und sieht daher keine großen Vergabepotenziale mehr an private Dienstleister.¹³ Eine Ausnahme stellen höchstens Gebäude in öffentlicher Hand – insbesondere Krankenhäuser – dar, bei denen vor allem bei kommunalen Einrichtungen große Einsparpotenziale durch ein Outsourcing der Reinigungsaufgaben an spezialisierte Dienstleister gesehen werden.

¹¹ Statistisches Bundesamt (2009): Der Dienstleistungssektor. Wirtschaftsmotor in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse 2003 bis 2008. (www.destatis.de)

¹² Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden Europäisches Statistik Amt 2010. (<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home>). Datenmaterial für 2007

¹³ Im Folgenden soweit nicht anders erwähnt Bundesinnungsverband des Gebäudereiniger-Handwerks (2010): Daten und Fakten. (http://www.qebaudereiniger.de/daten_fakten.html)



BODENREINIGUNG

→ 4 MARKTDATEN

Investitionsverhalten:

Die Kostenstruktur der Unternehmen gibt Tab. 3-5.4 wieder. Mit einer Personalaufwandsquote von 60,4% und einer Investitionsquote von 2,0% ist die Reinigungsbranche im Vergleich zu den anderen unternehmensnahen Dienstleistungen vergleichsweise personalintensiv und investitionsarm.

	In Mio €	In Prozent am Umsatz	Durchschnittswert 74 in % am Umsatz
Umsatz*	13 235,8	100,0	100,0
Sachaufwand	3 345,5	25,2	44,0
Personalaufwand	7 989,3	60,4	26,6
Investitionen	267,4	2,0	12,3

* Die Daten des Statistischen Bundesamtes weichen leicht von denen des europäischen Statistikamtes ab. Vgl. Tab. 3-5.3.

Tab. 3-5.4 Kostenstruktur „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ (WZ 74.7) 2007¹⁴.

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Gebäudereinigung“

Entfällt, da keine weiterführende Differenzierung der statistischen Daten möglich ist bzw. keine detaillierteren Studien verfügbar sind.

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Anwendungsfall von Servicerobotern bezieht sich ausschließlich auf den Bereich „Gebäudereinigung“ ab einer bestimmten Betriebsgröße. Aus diesem Grund wird auf

¹⁴ Statistisches Bundesamt (2010): Statistisches Jahrbuch 2010. (www.destatis.de)

Basis der Daten des Europäischen Statistikamtes der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-5.5):¹⁵

- Statistisch relevanter Sektor ist die „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ (WZ 74.7).
- Es wird angenommen, dass die Reinigung von Verkehrsmitteln, die hier nicht betrachtet werden, auch nur einen kleinen Teil der Unternehmen ausmacht und so keine weitere Korrektur notwendig ist.¹⁶
- Es wird angenommen, dass nur Reinigungsunternehmen ab einer bestimmten Größe in der Lage sind, die für die Serviceroboter-Investitionen notwendigen, finanziellen Mittel aufzubringen. Dies erscheint nur für Reinigungsunternehmen mit 250 und mehr Mitarbeitern plausibel.¹⁷

Reinigungsunternehmen insgesamt	22 988
davon mit 250 und mehr Mitarbeitern	610

Tab. 3-5.5 Ableitung des relevanten Zielmarkts.

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 610 Reinigungsunternehmen als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-5.6):

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme betrug 2007 82,7 Mio Euro.¹⁸

¹⁵ Europäisches Statistikamt 2010.

(<http://lepp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home>).

¹⁶ Dies folgt aus einem Vergleich der Unternehmenszahlen aus Tab. 3-5.3 mit den Daten des Bundesinnungsverbands des Gebäudereiniger-Handwerks (2010).

¹⁷ Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit durch die Reinigungsunternehmen. Bei der hier betrachteten SR-Investition sind Mittel in Höhe von mindestens 93,5 Tsd Euro notwendig. Erst Reinigungsunternehmen mit 250 und mehr Mitarbeitern liegen mit durchschnittlichen Investitionen von 135,5 Tsd Euro signifikant über diesem Wert (vgl. Tab. 3-5.3).

¹⁸ Vgl. Tab. 3-5.3



01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 4 MARKTDATEN

- Es wird geschätzt, dass etwa 50% dieser Summe in technische Ausrüstungen investiert wird (~41,4 Mio Euro).¹⁹ Weiterhin wird geschätzt, dass davon wiederum 10% für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen könnten (~4,1 Mio Euro).²⁰
- Jedes Serviceroboter-System besteht aus einem Serviceroboter. Bei einem Systempreis von 93,5 Tsd Euro (SR-Variante A) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~ 44 Servicerobotern (44 Serviceroboter-Systemen) führen – was letztlich zu einer Installed Base von 308 Servicerobotern (308 Serviceroboter-Systemen) im eingeschwungenen Marktzustand führen würde (Lebensdauer 7 Jahre). Für SR-Variante B ergeben sich Werte von ~25 Servicerobotern (25 Serviceroboter-Systemen) pro Jahr bzw. 175 Serviceroboter (175 Serviceroboter-Systeme) als Installed Base.
- Diese Werte sind allerdings nur als obere Grenzen für das Marktpotenzial zu sehen – ihr Erreichen setzt eine nach den Maßstäben der Branche positive Wirtschaftlichkeitsbetrachtung voraus. Aufgrund der negativen LCC-Betrachtung der hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsfelder (vgl. [Kapitel 3.5.3.1](#)) kann das hier errechnete Marktpotenzial nur langfristig und nur unter der Voraussetzung signifikanter Optimierungen hinsichtlich der Lebenszykluskosten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

Relevante Betriebe

Brutto Investitionssumme (T€)	~82 700
davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~41 400
davon SR-Potenzial (T€)	~4 100
Marktpotenzial SR-#SR/Jahr; SR-Systempreis T€ 93,5/163,0; 1 SR-pro System)	
errechnet	~44 / 25
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~0 / 0
Errechneter max. Bestand an SR (7 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
errechnet	~308 / 175
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~0 / 0

Tab. 3-5.6 Ableitung des Marktpotenzials (eigene Schätzungen).

¹⁹ In Ermangelung geeigneter Daten. Da angenommen wird, dass der Anteil der Investitionen in Gebäude und Anlagen in der Reinigungsbranche im Vergleich zu anderen Branchen zugunsten von Investitionen in technische Ausrüstungen (also Reinigungsgeräte) eher gering ist, wird der Anteil von letzteren mit einem vergleichsweise hohen Wert angesetzt.

²⁰ In Ermangelung geeigneter Daten. Die hier betrachteten SR-Lösungen ersetzen zwar konventionelle Geräte und lösen daher sachlich keinen zusätzlichen Investitionsbedarf aus (also keine zusätzlichen Geräte). Da sie aber einen wesentlich höheren Bedarf an Finanzmitteln haben als die Geräte, die sie ersetzen, konkurrieren sie faktisch aber dennoch um die knappen Finanzmittel mit anderen, notwendigen Investitionsprojekten. Daher wird ein niedriger SR-Anteil an den Investitionen angesetzt.



BODENREINIGUNG

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass höchstens die SR-Variante A eine wirtschaftliche Alternative zur manuellen Erbringung darstellen könnte – allerdings nur unter den Einschränkungen, dass
 - (1) sich die Lohnentwicklung aus Sicht der Reinigungsunternehmen tatsächlich so negativ darstellt wie hier angenommen (branchenweiter Mindestlohn),
 - (2) beide Lösungen eine vergleichbare Arbeitsleistung bereitstellen (Vollauslastung; 100% Verfügbarkeit) oder
 - (3) die Anschaffungskosten signifikant sinken.
- Aber selbst im Falle vergleichbarer, laufender Kosten ist eine Amortisation der Investition im Vergleich zur manuellen Alternative momentan nicht möglich.
- Der SR-Einsatz bietet zwar verschiedene, qualitative Nutzen-Vorteile (Dokumentation/Protokollierung). In einer so investitionsarmen Branche wie der Reinigungswirtschaft wird diesen aber nur eine geringe investitionsentscheidende Bedeutung zufallen.
- Vor diesem Hintergrund wird momentan mit einer eher kleinen Marktakzeptanz gerechnet. Potenziale bieten sich insbesondere für Unternehmen, die in der Lage sind, ihre Serviceroboter deutlich stärker auszulasten als hier angenommen. Aufgrund des hohen Anteils der Anschaffungskosten bietet auch eine weitere Reduktion dieser einen Hebel zur Erhöhung der Marktakzeptanz – allerdings diesmal auf Seiten der Systemintegratoren/Hersteller. Insgesamt wird daher mit einer nur kleinen Ausschöpfung des Marktpotenzials gerechnet.
- Aufgrund der noch fehlenden Wirtschaftlichkeit der SR-Lösungen wird daher mittelfristig mit keiner nennenswerten Ausschöpfung der errechneten Marktpotenziale gerechnet – langfristige Potenziale ergeben sich nur im Falle weiterer und signifikanter Verbesserungen der Wirtschaftlichkeit.

5.2 Forschungsbedarf

Der abgeleitete Forschungsbedarf ist nach Prioritäten geordnet.

- Grundlegende Softwarefunktionen wie Kognition und Planung erfordern höhere Robustheit gegenüber
 - Lichtverhältnissen,
 - Größen- und Formvarianzen von Objekten,
 - Farbabweichungen und
 - Unsicherheiten und Rauschen in den Sensordaten.

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Objekterkennung muss demnach auch bei Varianzen zu den Sollwerten gegeben sein.

- Optimierung der kognitiven und Planungs-Algorithmen hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Rechenzeit
 - Ausführung idealerweise in weicher Echtzeit
 - Ausführung auf eingebetteten Systemen anstatt Hochleistungsrechnern
- Datenfusion der Sensordaten bei hohem Datenaufkommen muss sehr performant und zuverlässig die Ergebnisse bereitstellen können.
- Skaleneffekte notwendig bei teuren Hardwarekomponenten, da dies die Kostentreiber auf Hardwareseite sind:
 - Roboterarm
 - Kraft-Momenten-Sensor
 - Laserscanner
 - Time-of-Flight-Kamera

Die hohen Softwarekosten beruhen auf der Abschätzung der zugrundeliegenden ROS-Architektur. Darin wird eine Infrastruktur mit Basisfunktionen geschaffen, für die jedoch applikationsspezifischer Code implementiert werden muss. Ferner handelt es sich bei ROS bisher nicht um eine industriell eingesetzte Software-Plattform, sondern ROS ist eher als in der Entwicklung befindlich einzustufen.





01

02

03

04



05

06

07

08

09

10

11

BODENREINIGUNG

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B
CCD-Kamera	2 x 500 €	3 x 500 €
Hokuyo Laserscanner	2 x 1 500 €	2 x 1 500 €
6-D Kraft-Momenten-Sensor	10 000 €	-
Roboterarm mit 6 DOF	17 000 €	17 000 €
Elektrischer 2-Finger-Greifer	5 000 €	-
Ultraschall-Sensoren	8 x 300 €	8 x 300 €
Nicht-holonome Plattform	25 000 €	-
Holonome Plattform	-	45 000 €
Reinigungsmodul	1 500 €	1 500 €
Indoor-Lokalisierung	500 €	500 €
Time-of-Flight-Sensor	6 000 €	6 000 €
Schunk-SDH mit Kraftsensorik	-	48 000 €
Optischer Abstandssensor	500 €	500 €

Tab. 3-5.7 Anschaffungskosten.



SZENARIOSTECKBRIEF

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS



06



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG



01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

In großen Krankenhäusern werden bereits heute logistische Aufgaben teilweise automatisiert durchgeführt. Fahrerlose Transportsysteme (FTS) führen dabei in der Regel einen Punkt-zu-Punkt Transport (z.B. zwischen einem „zentralen Bahnhof“ und „Etagenbahnhöfen“) durch. Das Personal schiebt dazu die zu transportierenden Behälter an spezielle Aufnahmestationen im Zentral- oder Etagenbahnhof. Dort docken die Fahrzeuge an, werden beladen und fahren zum jeweiligen „Zielbahnhof“, an dem wiederum angedockt und die Fracht abgegeben wird. Den Abtransport vom Bahnhof übernimmt dann wieder das Personal.

Randbedingungen beim heutigen Containertransport:

- Es werden entsprechende Veränderungen in der Umgebung „Etagen-“ und „Zentralbahnhöfe“ sowie Marker, Leitlinien oder ähnliches benötigt. Dies verursacht vergleichsweise hohe Investitionskosten.
- Aufgaben des Personals: Die Container maschinengerecht vorbereiten und auf dem Bahnhof einlagern.
- Das Personal auf der Station muss seinen eigenen Arbeitstakt den Maschinen anpassen (Bahnhof leer/voll).
- Materialcontainer können Essen, Abfall oder Medikamente enthalten.

Schema

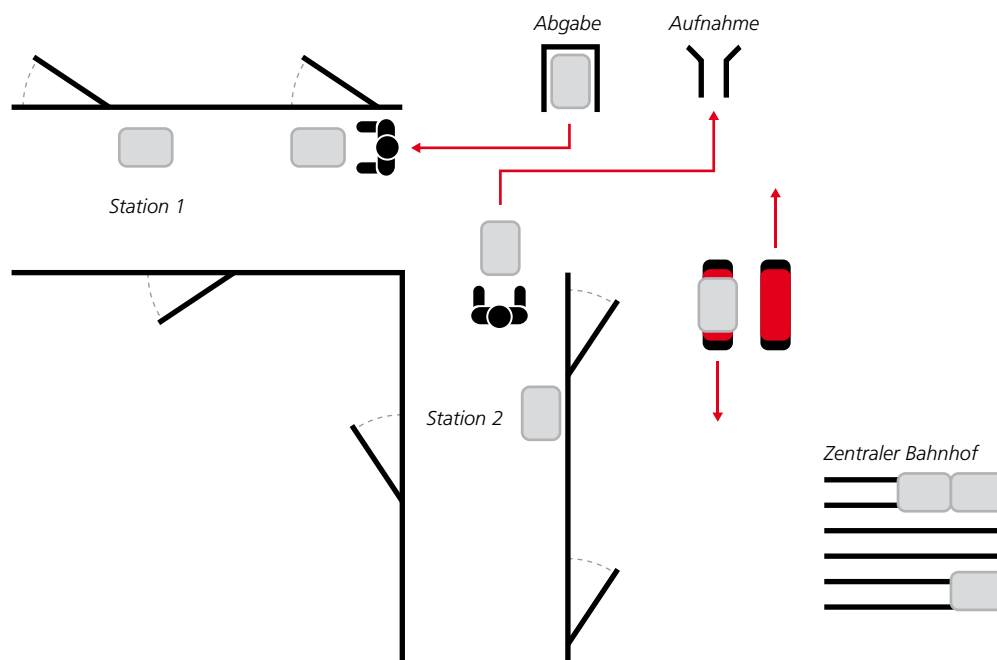


Abb. 3-6.1 Status quo – Logistik in Großkrankenhäusern (Schema).



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.2 Probleme

- Aufwändige Infrastruktur und damit einhergehende hohe Investitions- und Wartungskosten erschweren den Einsatz solcher Systeme insbesondere in kleineren Krankenhäusern.
- Geringe Flexibilität bindet Personal und kann zu Stillstandszeiten führen (Versäumnis Container auf/von Bahnhof zu schieben, liegengebliebenes Fahrzeug, ...).
- Bindung an Infrastruktur (zentraler Bahnhof) erschwert sortenreine Lagerung. Im zentralen Bahnhof stehen z.B. Müll und Medikamente neben einander.
- Zahl möglicher Zielorte zur Aufnahme und Abgabe ist begrenzt (nur ein Bahnhof pro Etage statt ein Bahnhof pro Station).

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Neuartige Methoden zur Navigation und Steuerung von mobilen Robotern, wie sie derzeit insbesondere in der Servicerobotik entwickelt und eingesetzt werden, könnten die Flexibilität des Transportsystems erheblich erhöhen und gleichzeitig den Infrastrukturbedarf deutlich reduzieren.

So existiert mittlerweile eine Reihe von Verfahren, welche auf Marker oder Leitlinien völlig verzichten können. In Verbindung mit Verfahren, wie sie insbesondere vor dem Hintergrund der Manipulation von Objekten entwickelt wurden, könnte zudem auf Bahnhöfe ganz oder teilweise verzichtet werden. Weiterhin ist die automatische Detektierung des Containertyps (Müll, Essen, Medikamente etc.) technisch machbar und würde so eine Sortierung der Transportgüter ermöglichen.

Prozess

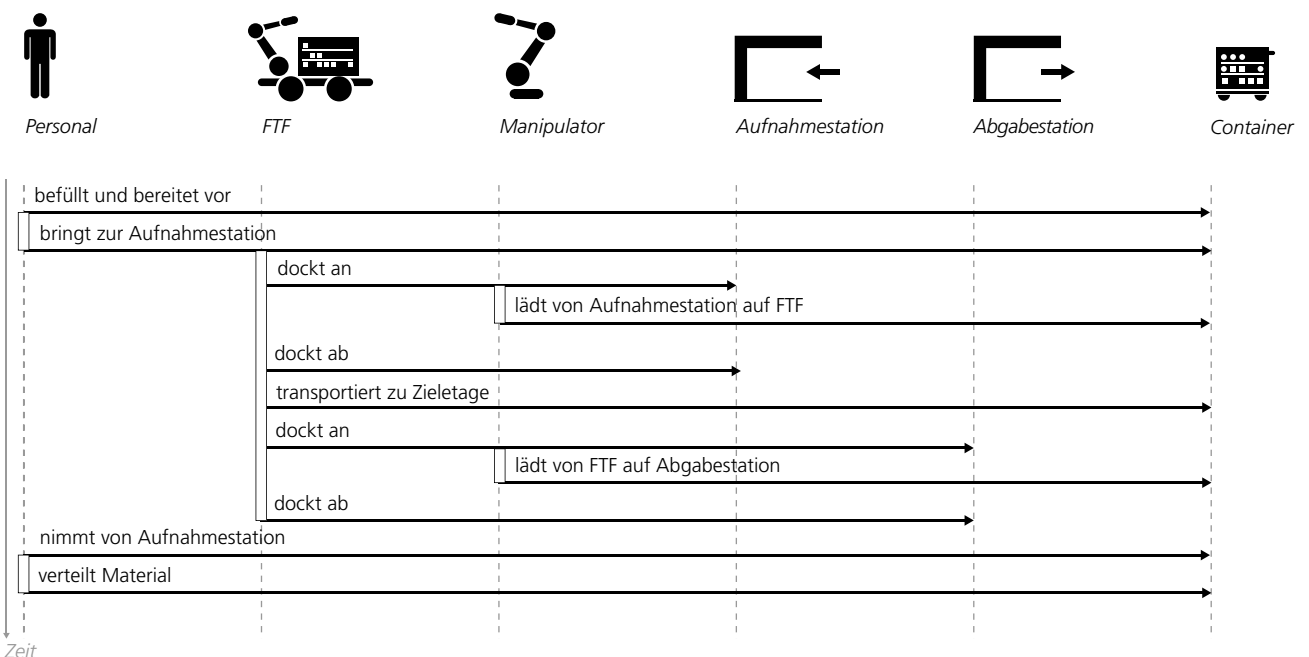


Abb. 3-6.2 Status quo – Logistik in Großkrankenhäusern (Ablauf)



01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Damit könnte in Großkrankenhäusern die Effizienz bestehender Transportsysteme verbessert und in kleineren Häusern der Einsatz zukünftig ermöglicht werden. Insbesondere die Aufgabe des Personals, Container zu den Etagenbahnhöfen zu transportieren und dort wieder abzuholen, würde entfallen. Mittel- bis langfristig könnte man auf die Bahnhöfe gänzlich verzichten. Auch ein sortenreines Lagern (z.B. eine separate Abstellfläche für den Müll) und damit eine Verbesserung der logistischen Abläufe und der Hygiene wäre denkbar.

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Gesundheitswesen – Krankenhaus (Stand 2007):¹

- Maßgeblich finanziert durch gesetzliche Versicherung (Deutschland)
- Hoher Kostendruck (Kapazitätsreduktion: 1990 – 2007: Betten -25%, Häuser -15%)
- Kosten Krankenhäuser: ca. 56,8 Mrd Euro; (64 Mrd Euro inkl. Forschung und Lehre)
- Kosten stark durch Personalkosten geprägt (~64% der Gesamtkosten)
- Marktvolumen Gesundheitswesen (2006): ca. 244 Mrd Euro ~ 10,6% des BiP (ca. 3 400 Euro/Kopf)
- Starke gesetzliche Regulierung als potenzielles Wettbewerbs- und Innovationshindernis

1.4.2 Einsatzbereich

Krankenhaus – Infrastruktur:

- Ca. 2 000 Krankenhäuser mit insgesamt ca. 500 000 Betten (2007)
- Ca. 1 Mio Beschäftigte (davon *nur* 140 479 Ärzte und 392 711 Pflegekräfte)
- Dienstleistungen „Rund um die Uhr“ – meist im

3- oder 2-Schicht-Betrieb

- Ca. 1/3 der Krankenhäuser sind in privater Hand (Trend verstärkt sich)
- Einsatz von FTS überwiegend in Großkrankenhäusern (mehr als 600 Betten)
- Anteil solcher Einrichtungen: 7% der Krankenhäuser; 29% der Betten

Diagramm

Bettenverteilung nach Krankenhausgröße (2007)

Krankenhäuser nach Krankenhausgröße (2007)

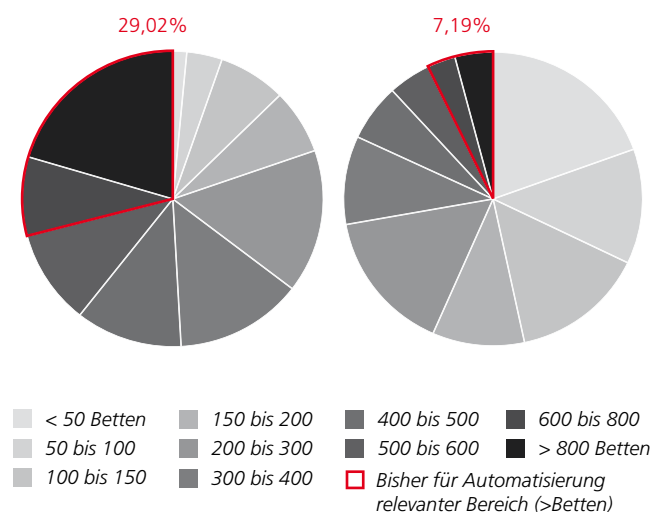


Abb. 3-6.3 Marktanteil der Krankenhäuser, welche so groß sind, dass bereits mit den gegenwärtigen Methoden eine Automatisierung wirtschaftlich sinnvoll erscheint. Da die Wirtschaftlichkeit von vielen Faktoren inklusive der bestehenden Infrastruktur oder internen Prozesse abhängt, muss sie immer von Fall zu Fall geprüft werden.

¹ Quelle: Statistisches Bundesamt »DEStat: Gesundheit – Grunddaten der Krankenhäuser«; 2007



01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Der Transportroboter entlastet in nichtautomatisierten Einrichtungen die für den Warentransport zuständigen Mitarbeiter. Im Vergleich zu bereits existierenden Lösungen entlastet er zusätzlich das Stationspersonal, bzw. das Personal im Logistikbereich. Er verrichtet typischerweise folgende Aufgaben:

- Erkennen abzutransportierender Gegenstände (Behälter, Betten, ...); ggf. mit menschlicher Unterstützung – „Rufen über Stationsterminal“
- Aufnahme und Abtransport der Gegenstände
- Optimierung und Adaption der Fahrwege
- Klassifizierung und Sortierung der Gegenstände (ggf. mit menschlicher Hilfe – Barcodes, ...)
- Abladen der Gegenstände im vorgesehenen Bereich (sortenrein)

2.2 Roboterentwurf

Der Roboter verfügt in dem dargestellten Konzept über von der Infrastruktur unabhängige Sensoren, einen Touchscreen

zur direkten Nutzerinteraktion und eine Hebevorrichtung zur Aufnahme unterschiedlicher Objekte (Betten, Behälter, ...). Der Roboter ist sehr flach, so dass er eine Vielzahl von Objekten (Container, Betten, etc.) unterfahren kann.

Wird eine Transportleistung angefordert, fährt der Roboter zur entsprechenden Krankenstation und sucht das zu transportierende Objekt. Dabei ist es prinzipiell möglich, Objekte durch Abstellen in einem Ziel-/Abholbereich, durch technische Markierung (z.B. mittels RFID) oder per direkter Mensch-Maschine-Interaktion am Touchscreen für einen Transportauftrag zu „markieren“.

Der Roboter erkennt die Konturen des Objektes, dockt eigenständig an und transportiert das Objekt ab. Alternativ kann der Roboter für Sonderfahrten angefordert und manuell beladen werden. Auch alternative Zielpositionen können über den Touchscreen (anklicken auf Karte der Umgebung) manuell eingegeben werden.

Sequenzdiagramm

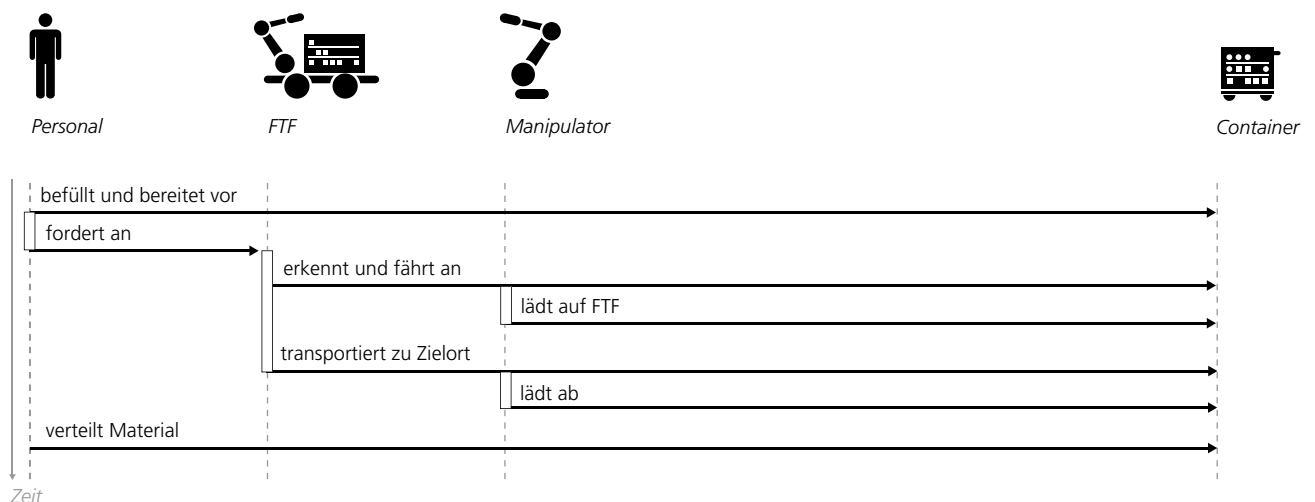


Abb. 3-6.4 Flexibler Gütertransport (Ablauf)



01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

i



Roboterentwurf

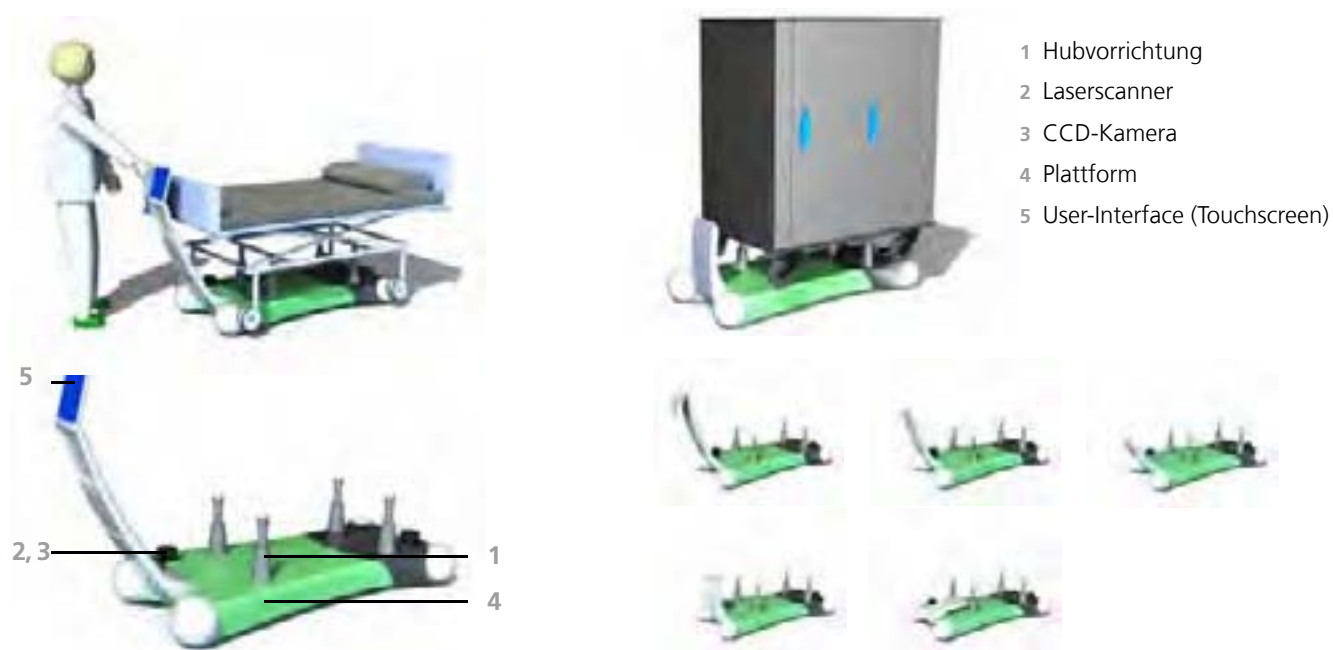


Abb. 3-6.5 Universeller Transportroboter für den Einsatz im Krankenhaus; oben: beladen mit einem Krankenbett (links) bzw. mit einem Container (rechts); unten: mit sicherheitsrelevanten Sensoren und Lastaufnahmesystem (Hebezyliner); einfahrbares Touchpanel zur manuellen Bedienung durch das Stationspersonal

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Im Rahmen des Axiomatic Design (Abb. 3-6.9 und 3-6.10) wird ein marktnahes Transportsystem skizziert. In der Variantenbildung wird ein mögliches „low-cost-System“ konzipiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Hardwarekomponenten genannt. Dabei wird zwischen unkritischen und systemkritischen Komponenten mit und ohne Produktstatus unterschieden.

Unkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, bereits relativ günstig, nur geringe Skaleneffekte zu erwarten):

- Hubvorrichtung 1-D
- Kommunikationsinfrastruktur WLAN (Weiterentwicklungen münden meist in Leistungssteigerungen statt Kostenreduzierung; langfristig eröffnen sich hier Möglichkeiten,

rechenintensive Operationen auszulagern)

- Touchscreen (weiterhin leichter Preisverfall zu erwarten)
- RFID/Barcode-Leser (leichter Preisverfall zu erwarten)

Systemkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, nur geringe Skaleneffekte zu erwarten, sehr teuer, Alternativen dringend nötig):

- Transportsysteme besitzen bereits hohen Reifegrad, damit werden die Anforderungen voll erfüllt
- Laser 2-D (Laserentfernungsmesser zur sicherheitstechnischen Überwachung z.B. Sick S300 oder Navigation z.B. Sick NAV)
 - Reflektorbasierte Lasersysteme zur Positionsbestimmung (derzeit teuer und hohe Installationskosten)
 - Sicherheitssensoren (derzeit teuer: 2 x 270° Scanner ~ 7 000 Euro)



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

- Forschungsbedarf: Robuste Lokalisierung mit Sicherheits-sensoren im Kontext mit natürlichen Merkmalen; um die Modifikation der Umgebung und zusätzliche Navigationssensoren einzusparen
- 3-D CCD-Kamera («Time of flight» Sensoren liefern «echtes» 3-D Bild – ohne Farbe):
 - Aktives Messsystem (moduliertes Infrarotlicht)
 - geeignet für Volumen-Kollisionsschutz (in den Fahrbereich ragende Hindernisse)
 - Kosten pro Einheit ~800 Euro (effector 3d von PMD)
 - Öffnungswinkel 40° x 30°, mehrere Systeme notwendig (4 – 6)
 - Derzeit keine Sicherheitszertifizierung; begrenzte Auflösung; Probleme bei schnellen Bewegungen
 - Günstige Alternative: Ultraschall, ggf. zu störungsanfällig für autonomes Transportsystem mit hoher Verfügbarkeit

Systemkritische Komponenten ohne (Serien-)Produktstatus (Spezialanfertigungen, keine vereinheitlichten Produktionsprozesse, Skaleneffekte zu erwarten)

TRL/€/FR-Diagramm

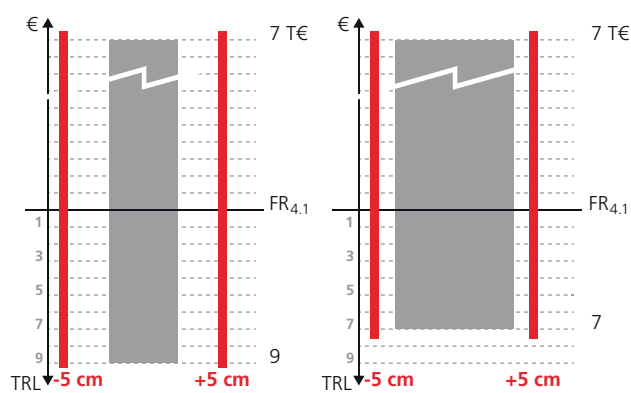


Abb. 3-6.6 TRL für laserbasierte Navigation mittels Reflektormarken und dedizierter Sensoren (links) sowie bei Verwendung natürlicher Merkmale und Sicherheitssensoren (rechts)

TRL/€/FR-Diagramm

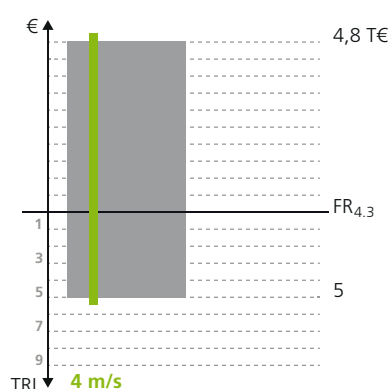


Abb. 3-6.7 TRL für Volumen-Kollisionsschutz mittels 3-D CCD-Kameras (liefert Grauwertbild mit Tiefeninformationen)

- Mobile Plattform (ohne exterorezeptive Sensoren)
 - Einfache Variante mit Differentialantrieb oder Dreiradkinematik, Traglast ca. 250 kg
 - Flache Bauweise zur Auslegung als Unterfahrschlepper (Lasten werden mit Hubeinheit vom Boden gehoben)
 - Eigengewicht und Abmessungen geeignet für Einsatz in Krankenhaus

TRL/€/FR-Diagramm

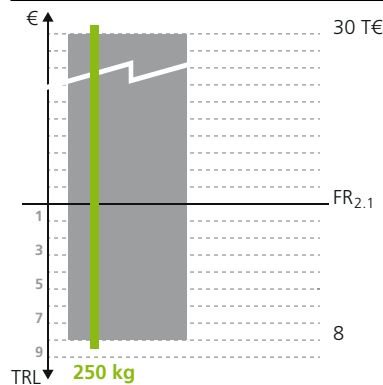


Abb. 3-6.8 Mobiles Trägersystem ohne exterorezeptive Sensoren (Differentialantrieb)





CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

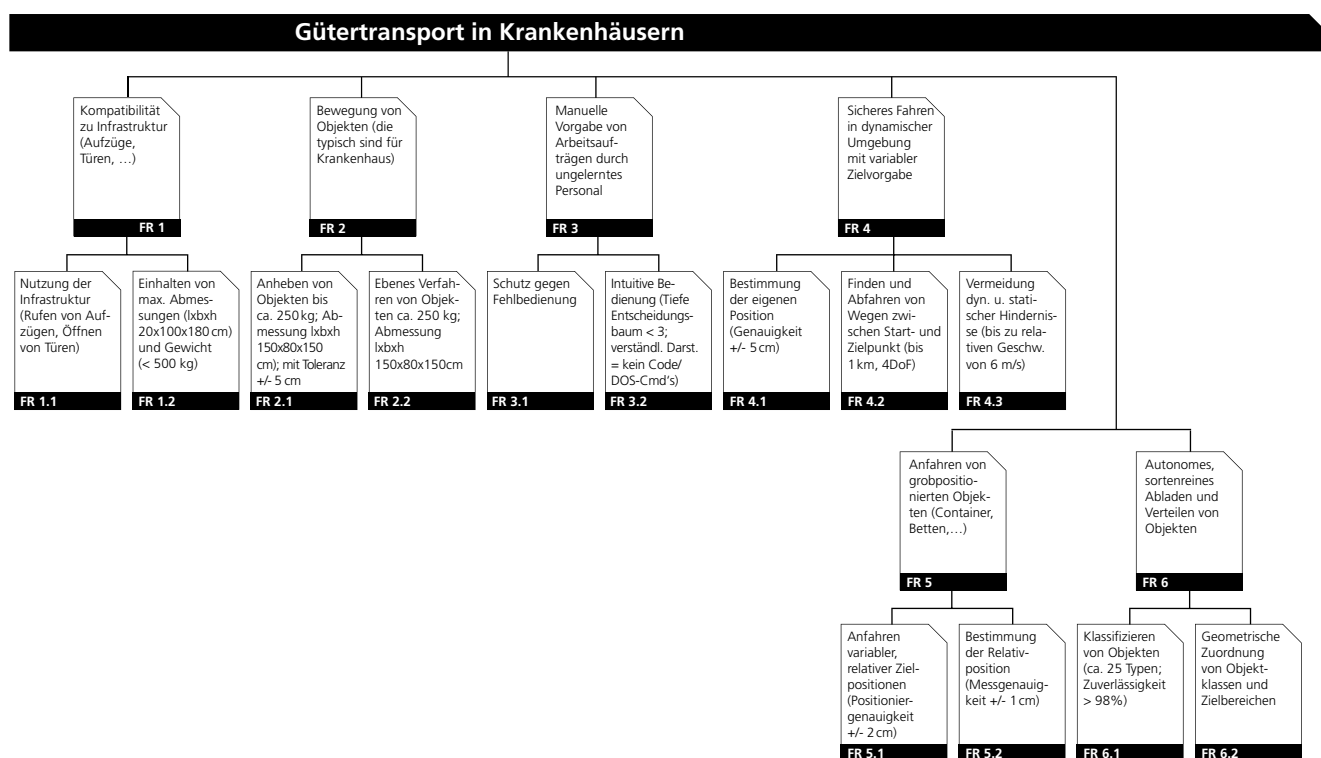


Abb. 3-6.9 Axiomatic Design – Functional Requirements



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

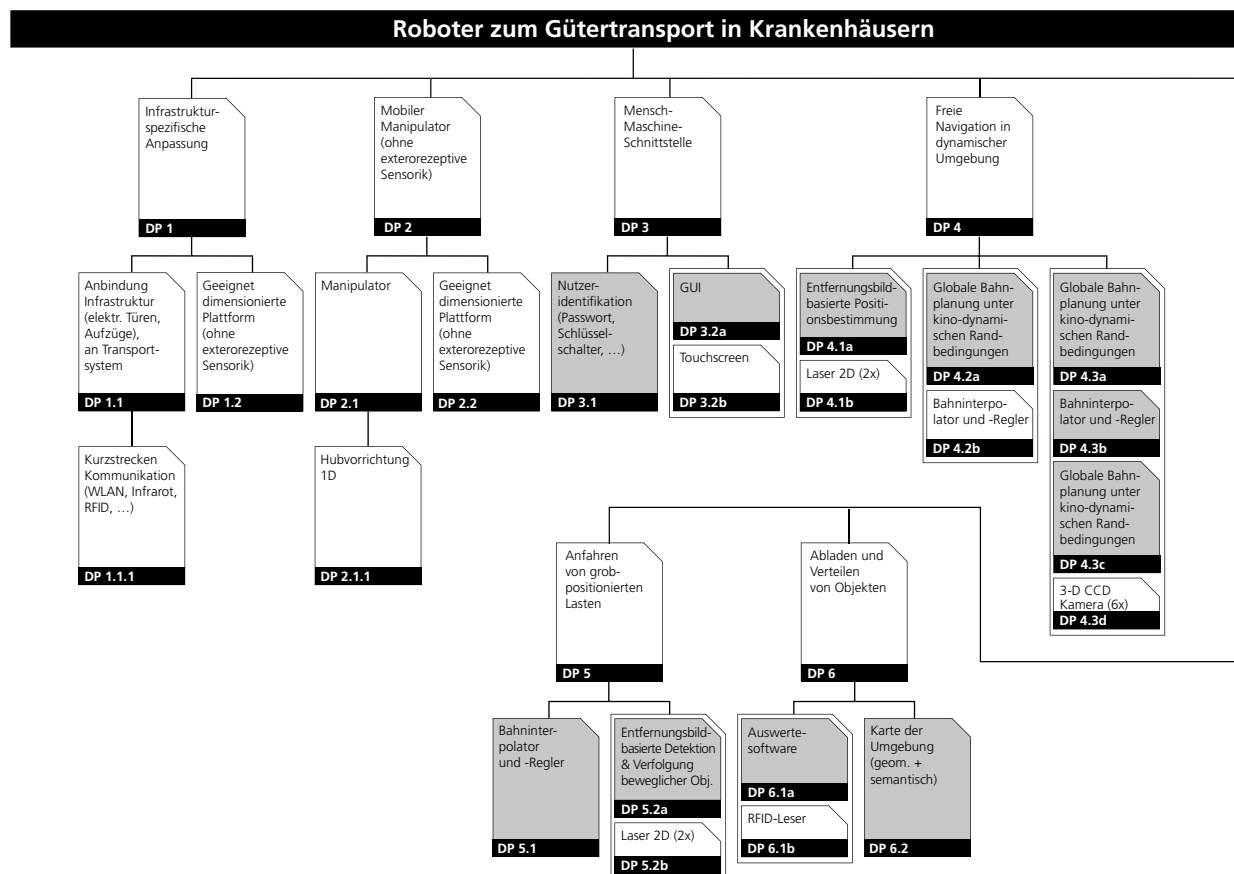


Abb. 3-6.10 Axiomatic Design – Design Parameter

2.2.2 Software

Von zentraler Bedeutung sind die der Navigation zugeordneten Softwarekomponenten: markerlose Lokalisierung und Bahnplanung, bzw. -anpassung. Weiterhin wird eine Objektlokalisierung und Umgebungserkennung benötigt, um zu transportierende Objekte zu erkennen, diese aufzunehmen und auch dynamisch in vorgesehenen Abstellbereichen wieder abzugeben. Die folgenden Komponenten sind Teil der geforderten Softwarestruktur:

- GUI
- Leitsteuerung/MES (als Produkt verfügbar)

- Globale Bahnplanung unter dynamischen Randbedingungen auch ohne Markierungshilfsmittel
- Lokale Bahnplanung unter dynamischen Randbedingungen wie z.B. Personenverkehr, Zielposition aus Sensordaten
- Bahninterpolator /-Regler für differentielle Kinematik
- Entfernungsbild-basierte Detektion und Verfolgung von Objekten
- Entfernungsbild-basierte Positionsbestimmung
- Integration in die Steuerungsarchitektur



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.3 Varianten

Als erhebliche Einschränkungen für den Markterfolg von autonomen Transportsystemen erscheinen derzeit die geringe Flexibilität sowie auch die hohen Kosten sowohl des einzelnen Fahrzeugs als auch bei der Einrichtung des Transportsystems (Anpassungen an die Infrastruktur). Das ausgearbeitete Szenario adressiert insbesondere die Punkte Flexibilität und Einrichtungsaufwand (Verzicht auf künstliche Marker). Dabei werden vor allem bereits etablierte oder kurz vor der Marktreife stehende Sensoren und Verfahren eingesetzt.

In diesem Abschnitt wird eine „low-cost“ Variante (sog. SR-Variante B) skizziert. Dabei wird insbesondere auf eine Reduktion der Kosten für die exterorezeptive Sensorik abgezielt. Die skizzierten Verfahren sind noch weit von der Marktreife entfernt, teilweise ist die Machbarkeit der angedachten Verfahren noch nicht voll belegt. Exemplarisch werden die beiden besonders sensorabhängigen und gleichzeitig sicherheitskritischen Komponenten „Positionsbestimmung“ und „Hindernisvermeidung“ betrachtet. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die jeweils zugehörigen „technology readiness level“ (TRL) einander gegenüber gestellt.

2.2.3.1 Komponente „Bestimmung der eigenen Position“

Eine exakte Lokalisierung lässt sich mit diversen Sensoren und Verfahren erzielen. Sämtliche etablierte Verfahren bedürfen dabei einer Modifikation der Umgebung (Induktionslinien, Magnete, optische Leitlinien oder Reflektormarken). Daher bedürfen solche Transportsysteme einer aufwändigen und kostspieligen Installation und sind vergleichsweise unflexibel. Insbesondere spätere Anpassungen sind schwierig vorzunehmen. Mittlerweile befinden sich erste laserbasierte Verfahren in Probeeinsätzen, welche anhand natürlicher Landmarken (Wände, Kanten) navigieren. Allerdings sind die hier eingesetzten Sensoren kostspielig. In Abbildung 3-6.11 wird ein Sensorsystem aus zwei Sick S300 Laserscannern

(jeweils 270° Sichtbereich) angenommen. Die Kosten liegen im Bereich heutiger, auf Reflektormarken basierender Lasernavigationssysteme. Diesem Setup ist ein kamerabasiertes Sensorsystem gegenübergestellt. Der Einsatz von Kameras zur Lokalisierung ist derzeit Gegenstand der Forschung im Bereich der Servicerobotik und wird in ersten Kleinrobotersystemen (z.B. Staubsaugern) mit geringen Genauigkeits- und Sicherheitsanforderungen probeweise eingesetzt.

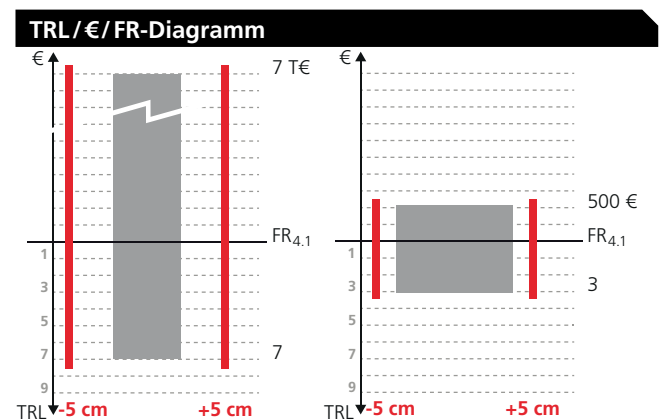


Abb. 3-6.11 TRL für laserbasierte (links) und kamerabasierte (rechts) Positionsbestimmung anhand natürlicher Landmarken

Die TRL-Einstufung erfolgte dabei auf Grundlage der Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit im Kontext kommerzieller Logistiklösungen.

2.2.3.2 Komponente „Vermeidung dynamischer und statischer Hindernisse“

Ein weiterer zentraler Punkt für die freie Navigation autonomer Systeme ist die Vermeidung dynamischer Hindernisse. In bisherigen Setups werden dazu meist Bumper und/oder Laserscanner eingesetzt. Durch die Wahl der Fahrwege wird sichergestellt, dass keine Hindernisse oberhalb der Sichtbereiche der Sensoren in den Fahrbereich hineinragen. Da bei dem hier skizzierten Szenario auf fest vorgegebene Fahrwege verzichtet wird, muss diese Funktion durch zusätzliche Sensoren bereit





CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

gestellt werden. Eine – derzeit intensiv untersuchte – Möglichkeit ist der Einsatz von 3-D-CCD-Kameras wie dem *efector 3d* von PMD. Eine kostengünstige Alternative könnten langfristig auch Kameras für die industrielle Bildverarbeitung sein. Eine bereits im Einsatz befindliche günstige Alternative sind Ultraschall-Sensoren, wie sie im Automobilbau eingesetzt werden. Diese Sensoren sind allerdings anfällig gegenüber »False Positives«, was bei autonomen Systemen schnell zu Systemstörungen führen kann. Das Diagramm in Abb. 3-6.12 vergleicht den Einsatz von sechs 3-D-CCD-Kameras (hier exemplarisch der *efector 3d*; Sichtbereich 40°x30°) mit einem System basierend auf 2-D Farbkameras.

TRL / € / FR-Diagramm

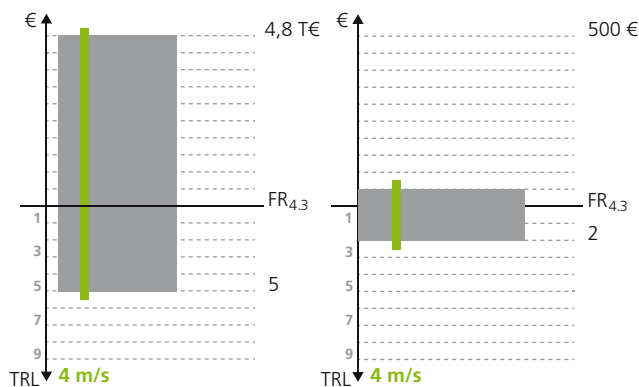


Abb. 3-6.12 TRL für Volumenkollisionsschutz mit 6 3-D-CCD-Kameras im Vergleich zu einem Ansatz basierend auf mehreren 2-D Farbkameras

2.2.3.3 Betrachtung des Gesamtsystems

Als Trägersystem kann im einfachsten Fall eine mobile Basis mit Differentialantrieb eingesetzt werden. Im Gegensatz zum Hardware-Katalog wurden hier reduzierte Kosten angenommen, da die exterozeptive Sensorik separat betrachtet wird. Damit ergeben sich die in Abbildung 3-6.13 dargestellten Varianten für das integrierte Gesamtsystem.

Da die verwandten Methoden zur Navigation auf Modifikationen der Umgebung verzichten, kann davon ausgegangen

werden, dass die Inbetriebnahmekosten erheblich geringer als bei gegenwärtigen Installationen ausfallen. Lediglich Fahrstühle und elektrische Türen müssen gegebenenfalls kabellos, über Kurzstreckenfunk (z.B. RFID oder Infrarot) an das System angebunden werden. Entsprechend ausgerüstete Türen oder Aufzüge können bereits heute als Produkte bezogen werden. Automatisierte Türen sind in vielen Krankenhäusern Standard, um z.B. Patiententransporte in Betten zu erleichtern.

TRL / € / FR-Diagramm

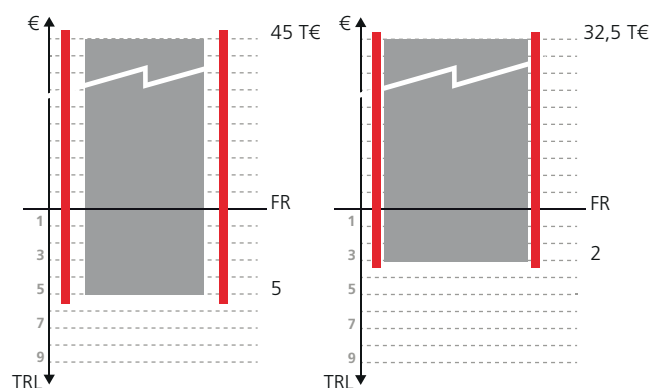


Abb. 3-6.13 Integriertes System (links: konventionelle Variante mit markerloser Navigation und rechts: low-cost Variante)

2.2.3.4 Zusätzlich benötigte Software

Die „low-cost“-Variante, welche auf den Einsatz teurer Sensoren verzichtet, benötigt insbesondere auf Seiten der Signalverarbeitung und Umgebungswahrnehmung zusätzliche, derzeit noch nicht verfügbare Softwarekomponenten. Dabei können zur Abschätzung der zu erwartende Komplexität der benötigten Softwaremodule die Module zur laserbasierten Navigation (die Aufgaben sind ähnlich) herangezogen werden. Da der Reifegrad kamerabasierter Verfahren derzeit aber noch weit geringer als bei laserbasierten Verfahren ist, steht zu erwarten, dass bei der Entwicklung entsprechender Algorithmen noch erheblicher Bedarf an experimenteller Evaluation besteht. Die hier abgeschätzten Kosten erfassen nicht diesen noch zu betreibenden Forschungsaufwand und stellen daher



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

nur eine sehr grobe Schätzung, die am unteren Ende der zu erwartenden Kosten liegen dürfte, dar.

Die wesentlichen Komponenten sind:

- Kamerabasierte Detektion und Tracking von Objekten
- Kamerabasierte Positionsbestimmung
- Integration in das Navigationssystem und die Navigationsplanung.

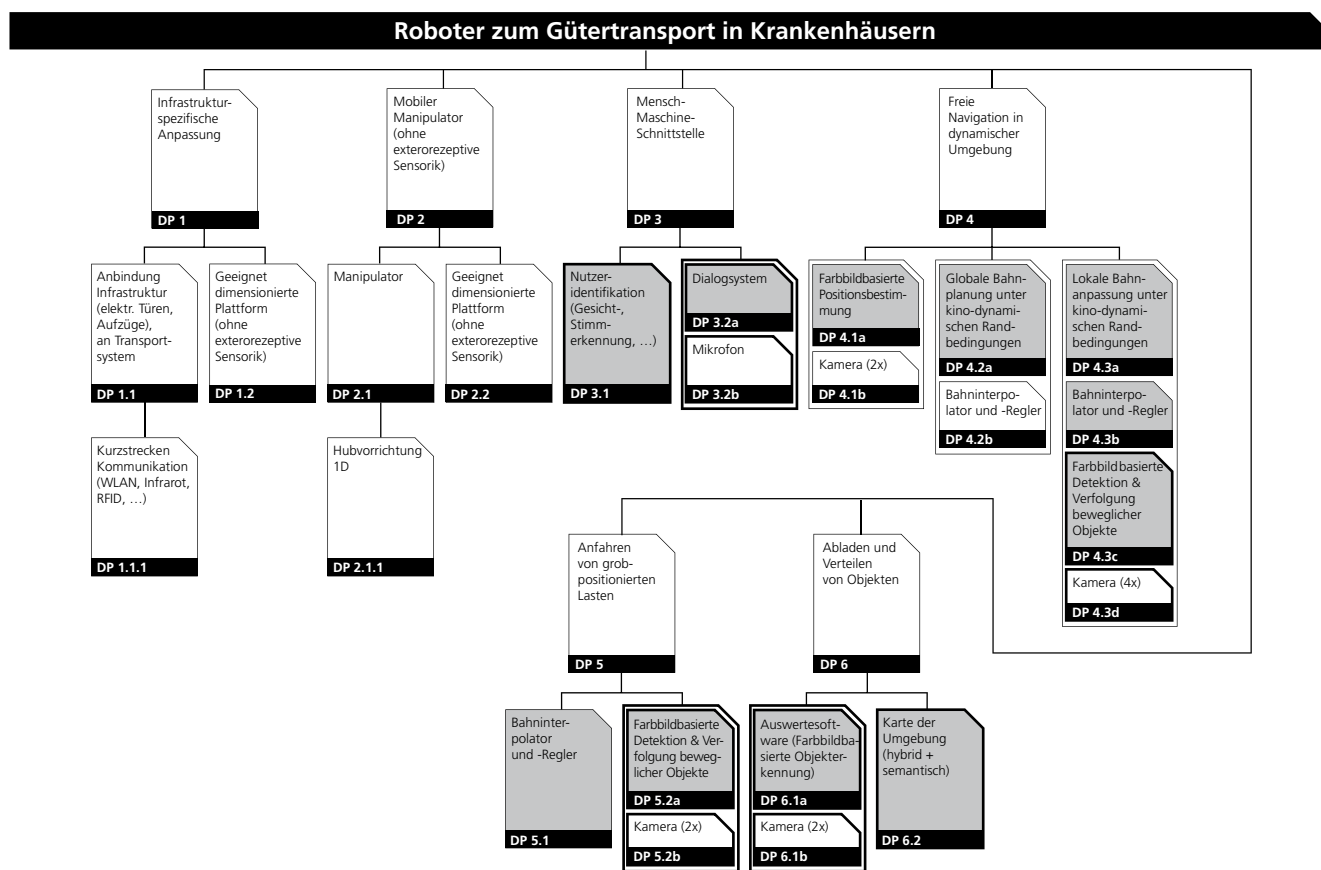


Abb. 3-6.14 Design Parameters eines Containertransporters mit low-cost Sensoren.



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
FR 1 Kompatibilität zur Infrastruktur	FR 1.1 Nutzung der Infrastruktur (Nutzung von Aufzügen, Öffnen von Türen)	DP 1.1.1 Kurzstreckenkommunikation	250 €	9	0	keine
	FR 1.2 Einhaltung von max. Abmessungen LxBxH: 20x100x180 cm; Gewicht: < 500 kg	DP 1.2 Geeignet dimensionierte Plattform	30 000 €	8	1	keine
FR 2 Bewegung von Objekten	FR 2.1 Anheben von Objekten Tragfähigkeit: >250 kg LxBxH: 150x80x150 cm	DP 2.1.1 Hubvorrichtung 1D	750 €	9	0	keine
	FR 2.2 Ebenes Verfahren von Objekten siehe FR 2.1	DP 2.2 Geeignet dimensionierte Plattform	siehe DP 1.2	8	1	siehe DP 1.2
FR 3 Manuelle Vorgabe von Arbeitsaufträgen durch ungelernetes Personal	FR 3.1 Schutz gegen Fehlbedienung	DP 3.1 Nutzeridentifikation		9	0	keine
	FR 3.2 Intuitive Bedienung	DP 3.2a / DP 3.2b Touchscreen und User-Interface		9	0	keine
FR 4 Sicheres Fahren in dynamischer Umgebung mit variabler Zielvorgabe	FR 4.1 Bestimmung der eigenen Position Genauigkeit +/- 5 cm	DP 4.1a / DP 4.1b Entfernungsbasierte Positionsbestimmung und Laserscanner 2-D (2x)	7 000 €	7	2	Navigieren ohne Marker und Hilfsmittel; Einsatz kostengünstiger Sensoren
	FR 4.2 Finden und Anfahren von Wegen zwischen Start- und Zielpunkt bis 1 km; 4 DOF	DP 4.2a / DP 4.2b Globale Bahnplanung, Bahninterpolator und Bahnregler		5	2	Freie Navigation ohne vorher definierte Wege; Bahnplanung durch Erkennung der Umgebung
	FR 4.3 Vermeiden dynamischer und statischer Hindernisse	DP 4.3a / DP 4.3b / DP 4.3c / DP 4.3d Lokale Bahnplanung; Bahnregelung; Entfernungsbild-basierte Detektion von Objekten; 3D-CCD-Kamera	4 800 €	5	2	siehe DP 4.2

>>



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
FR 5 Anfahren grobpositionierter Objekte	FR 5.1 Anfahren variabler Zielpositionen Genauigkeit +/- 2 cm	Bahninterpolator und Bahnregler	siehe DP 4.1	5	3	siehe DP 4.2
	FR 5.2 Bestimmung der Relativposition Messgenauigkeit +/- 1 cm	DP 5.2 siehe DP 4.1	siehe DP 4.1	7	3	siehe DP 4.1
FR 6 Autonomes, sortenreines Abladen und Verteilen von Objekten	FR 6.1 Klassifizierung von Objekten 25 Objekttypen Zuverlässigkeit > 98%	DP 6.1a / DP 6.1b RFID-Leser und Auswertesoftware	siehe DP 4.3	9	1	keine
	FR 6.2 Geometrische Zuordnung von Objektklassen und Zielbereichen	DP 6.2 Karte der Umgebung		9	1	keine

SR-Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen / derzeitige Hemmnisse
FR 4 Sicheres Fahren in dynamischer Umgebung mit variabler Zielvorgabe	FR 4.1 Bestimmung der eigenen Position Genauigkeit +/- 5 cm	DP 4.1a / DP 4.1b Farbbildbasierte Positionsbestimmung und 2D-CCD-Kamera	500 €	2	2	Sichere Positionsbestimmung unter stark schwankenden Lichtverhältnissen
	FR 4.3 Vermeiden dynamischer und statischer Hindernisse	DP 4.3c / DP 4.3d Lokale Bahnanpassung; Bahnregelung; Farbbildbasierte Detektion von Objekten; 2D-CCD-Kamera		2	2	Freie Navigation ohne vorher definierte Wege; Bahnplanung durch Erkennung der Umgebung
FR 5 Anfahren grobpositionierter Objekte	FR 5.2 Bestimmung der Relativposition Messgenauigkeit +/- 1 cm	DP 5.2 siehe DP 4.1	siehe DP 4.1	3	2	siehe DP 4.1
FR 6 Autonomes, sortenreines Abladen und Verteilen von Objekten	FR 6.1 Klassifizierung von Objekten 25 Objekttypen Zuverlässigkeit > 98%	DP 6.1a / DP 6.1b Farbbildbasierte Objekterkennung	siehe DP 4.1	3	1	Sichere Detektion von Objekten auch unter wechselnden Randbedingungen

Tab. 3-6.1 Komponentenübersicht



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Konventionelle Alternative: Fahrerloses Transportsystem (FTS)	
Grunddaten Use Case						
• Lebensdauer (a)	12		12		12	
• Anzahl Roboter (System)	20		20		20	
• Eff. Produktivzeit (h/a)	5 256		5 256		5 256	
• Personalstunden (h/a)	11 680		11 680		11 680	
• Transportaufkommen (Container/a)	255 500		255 500		255 500	
LCC-Summe (T€)	6 850,3	100%	6 380,2	100%	7 922,6	100%
• Investition	1 158,3	16,9%	864,5	13,6%	1 810,0	22,8%
• Installationskosten	8,0	0,1%	8,0	0,1%	20,0	0,3%
• Aktivitätskosten	4 893,0	71,4%	4 893,0	76,7%	4 910,6	62,0%
• Wartung/Instand.	791,0	11,5%	614,7	9,6%	1 182,0	14,9%
• Andere	-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)	-4 393,7		-3 999,8		-5 289,4	
Softwarekosten (T€)	3 336,9		4 649,4			
Leistungskosten (€/ Container)	2,23		2,08		2,58	

Tab. 3-6.2 LCC

Erläuterung zu Tabelle 3-6.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tabelle 3-6.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Serviceroboter-Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Systems ausgegangen (365 Tage). Das System wird in einem Zweischicht-Modell bei 8 h Schichtdauer eingesetzt – zum Betrieb sind je Schicht zwei Personen notwendig. Die Verfügbarkeit des Systems wird mit 90% angesetzt (technischer Ausfall; hohe Redundanz des Systems), so dass die effektive Produktivzeit 5 256 h/a beträgt. Das System hat ein Container-Aufkommen von 700 pro Tag zu bewältigen.

SR-Variante B: Keine Änderungen.

Konventionelle Alternative (FTS): Keine Änderungen.

Investition: Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (43,8 Tsd Euro pro Roboter) sowie der notwendigen Systemperipherie (Bedienterminals; 15 Tsd Euro) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des

Systemintegrators. Die sonstige Infrastruktur (elektrische/automatische Türen, Bodenmarkierungen etc.) ist über alle Alternativen gleich und daher hier nicht berücksichtigt.

SR-Variante B: Aufgrund der technischen geänderten Konfiguration ist die Summe der Komponentenkosten geringer als in der SR-Variante A (32,5 Tsd Euro/Roboter). Ansonsten keine Änderungen.
Konventionelle Alternative (FTS): Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (Verkaufspreis 75 Tsd Euro pro FTS) sowie der notwendigen, für das FTS spezifischen Systemperipherie (Leitsystem, Bahnhöfe; Verkaufspreis 310 Tsd Euro).

Installationskosten: Für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Systems bzw. Schulung wird ein externer Personalaufwand von 10 PT (80 Ph) angesetzt (100 Euro/Ph). Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen. Eine nennenswerte Schulung des Personals ist nicht notwendig (gerade der Vorteil des Systems).
SR-Variante B: Keine Änderung.

Konventionelle Alternative (FTS): Sowohl für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Systems bzw. Schulung wird jeweils ein externer Personalaufwand von 20 PT (160 Ph) bzw. 5 PT (40 Ph) angesetzt (100 Euro/Ph).



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Aktivitätskosten: Die Personalkosten werden für die notwendigen Bediener/Techniker mit 34 Euro/h angesetzt (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten). Die Techniker übernehmen auch die Betreuung des Systems während der Produktivzeit. Der Energieverbrauch beträgt 0,5 kW pro Roboter und 3 kW für die notwendige Infrastruktur während der Produktivzeit (68 328 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt.

SR-Variante B: Keine Änderung.

Konventionelle Alternative (FTS): Der Energieverbrauch beträgt 0,5 kW pro FTS und 5 kW für die notwendige Infrastruktur während der Produktivzeit (78 840 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt. Ansonsten keine anderen/zusätzlichen Aufwände.

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 10 PT (80 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von 100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

SR-Variante B: Keine Änderung.

Konventionelle Alternative (FTS): Keine zusätzlichen Aufwände.

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik (s. [Kapitel 2.3.1.2](#)) Abschätzung von Softwareentwicklungskosten) 3 337 Tsd Euro für SR-Variante A bzw. 4 649 Tsd Euro für die SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

- Die beiden SR-Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der konventionellen Lösung mit einem FTS im Wesentlichen nur durch die jeweils geringeren Anschaffungskosten. Es wird davon ausgegangen, dass die SR-Varianten genauso wie das konventionelle FTS in der Lage sind, das Containeraufkommen zu bewältigen, d.h. sie stellen nicht die Kapazitätsgrenzen im System dar.
- Kostenstruktur:** Verantwortlich für die Unterschiede in den Kostenstrukturen der Alternativen sind alleine die unterschiedlichen Anschaffungskosten der Alternativen. In allen Alternativen

(SR-Variante A/B und FTS) dominieren die Aktivitätskosten mit einem Anteil von ~71%/77% bzw. 62% den Großteil der Lebenszykluskosten, was fast ausschließlich auf die Lohnkosten der Techniker zurückzuführen ist. Letztere sind aufgrund der gleichen Personalstruktur über alle Alternativen identisch.

- Wirtschaftlichkeit:** Nach der vorliegenden LCC-Betrachtung sind alle SR-Varianten hinsichtlich ihrer Leistungskosten deutlich günstiger gegenüber der konventionellen FTS-Variante (Stückkosten von 2,23 bzw. 2,08 vs. 2,58 Euro pro transportiertem Container. Auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF sind die SR-Varianten deutlich günstiger als die FTS-Alternative (Tsd Euro -4 393,7/-3 999,8 vs. -5 027,1).² Bezüglich der laufenden Kosten führen die SR-Varianten A/B im Vergleich zur konventionellen Variante zu einer Ersparnis von 408,6 bzw. 584,9 Tsd Euro.³
- Sensitivität:** Aufgrund der vergleichbaren Kostenstruktur führt eine Sensitivitätsanalyse an dieser Stelle nicht zu einem Erkenntnisgewinn und ist daher an dieser Stelle nicht notwendig (alle relevanten Parameter ändern sich im Falle der Varianten gleichmäßig und proportional oder sind im Vergleich zu ihrem Gewicht bezüglich der Aktivitätskosten irrelevant).

3.2 Nutzwert

- Verbesserungen im Arbeitsfluss: Bisher wurde der Arbeitstakt vor allem durch das FTS vorgegeben. Mitarbeiter auf den Stationen mussten ggf. andere Tätigkeiten unterbrechen, um die Bahnhöfe frei zu räumen bzw. neu zu beladen.
- Erhöhte Bedienbarkeit durch eine Nutzerschnittstelle am Fahrzeug und Graphisches User-Interface (GUI)
- Flexible Anpassung der Transportdienstleistung durch das Stationspersonal (Abfangen von Stoßzeiten, besonders dringende Transporte, ...). Wird ermöglicht durch Verzicht auf feste Fahrwege und Bahnhöfe sowie GUI.
- Sortenreines Lagern verbessert Hygiene und Qualität.

² Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnte im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

³ Bsp.-Rechnung: Ersparnis SR-Variante A = (4 910,6 + 1 182,0) - (4 893 + 791) = 408,6.





01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Gesundheit“

Die Gesundheitsausgaben sind seit 1995 kontinuierlich gestiegen und betragen im Jahr 2006 245,0 Mrd Euro (vgl. Tab. 3-6.3).⁴ Hauptkostentreiber dieser Entwicklung sind neben dem aufgrund der demografischen Entwicklung gestiegenen Leistungsvolumen insbesondere auch Qualitätsverbesserungen sowie die Preisentwicklung der Gesundheitsdienstleistungen. Die überproportionalen Ausgabenzuwächse werden dabei nur teilweise auf den technologischen Fortschritt zurückgeführt – in einigen Leistungsbereichen wie der Arzneimittelversorgung werden als Gründe dafür auch ausdrücklich fehlende Wirtschaftlichkeitsanreize verantwortlich gemacht. Als weiteres prägendes Element der Gesundheitsausgaben wird die intensive Gesetzgebung angeführt – gerade in Hinsicht auf die gesetzliche Kranken- und Pflegeversicherung. Etwa die Hälfte der Gesamtkosten entfallen auf ärztliche und pflegerisch/therapeutische Leistungen (66,4 bzw. 58,8 Mrd Euro) – der Anteil der Investitionen an den Gesamtausgaben beträgt ca. 3,7% (9,0 Mrd Euro). Aus Sicht der Einrichtungen entfallen die meisten Ausgaben auf den Krankenhausbereich (63,9 Mrd Euro) – der Bereich Pflege

folgt mit 18,8 Mrd Euro erst an vierter Stelle.

Mit 139,8 Mrd Euro wird der Großteil der Kosten durch die Gesetzliche Krankenversicherung getragen, gefolgt von privaten Haushalten und Organisationen (33,3 Mrd Euro), den Privaten Krankenversicherungen (22,5 Mrd Euro) und der sozialen Pflegeversicherung (18,1 Mrd Euro) – der Rest verteilt sich auf die öffentlichen Haushalte, Arbeitgeber sowie die gesetzlichen Unfall- und Rentenversicherungsträger. Mit etwa 4,2 Millionen Beschäftigten findet sich etwa jeder 9te Arbeitsplatz in Deutschland im Gesundheitswesen (zum Vergleich: Automobilbau nur etwa jeder 50te). In vielen Bereichen wird über einen Arbeitskräftemangel geklagt, der sich in Zukunft noch verstärken wird.

Leistungsarten	1995	2000	2005	2006
Prävention / Leistungsschutz	7,5	7,5	8,9	9,3
Ärztliche Leistungen	51,7	57,5	64,4	66,4
Pflegerische/therapeutische Leistungen	43,7	52,3	57,5	58,8
Unterkunft / Verpflegung	16,0	16,5	17,7	18,5
Waren	47,8	55,7	64,5	65,8
davon:				
• Arzneimittel	26,4	31,6	39,4	39,6
• Hilfsmittel	8,8	10,4	10,5	10,9
• Zahnersatz (nur Material- und Laborkosten)	5,5	5,4	5,1	5,5
• sonstiger medizinischer Bedarf	7,2	8,2	9,5	9,8
Transporte	2,8	3,4	4,0	4,0
Verwaltungsleistungen	9,9	11,3	13,1	13,1
Investitionen	7,2	8,3	9,2	9,0
Gesamt	186,5	212,4	239,3	245,0

Tab. 3-6.3 Kostenstruktur in Mrd Euro der Gesundheitsausgaben nach Leistungsarten⁵

⁴ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden aus Robert-Koch-Institut (2006): Gesundheitsberichtserstattung des Bundes. Gesundheit in Deutschland. Zusammenfassung. (www.gbe-bund.de)

⁵ Gesundheitsberichtserstattung des Bundes (2010) (www.gbe-bund.de)



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 4 MARKTDATEN

Einrichtungen	1995	2000	2005	2006
Gesundheitsschutz	1,8	1,8	1,9	1,9
Ambulante Einrichtungen	87,0	100,8	115,3	118,6
davon:				
• Arztpraxen	27,0	30,8	35,1	36,4
• Zahnarztpraxen	14,0	14,7	15,2	15,8
• Praxen sonstiger medizinischer Berufe	4,8	5,8	7,0	7,1
• Apotheken	23,6	28,2	34,7	34,7
• Gesundheitshandwerk/-einzelhandel	12,5	14,1	14,7	15,5
• ambulante Pflege	3,9	5,8	7,1	7,4
• sonstige Einrichtungen	1,1	1,3	1,6	1,6
Stationäre/teilstationäre Einrichtungen, davon:	70,9	78,8	87,5	90,1
• Krankenhäuser	51,1	56,4	62,1	63,9
• Vorsorge-/Rehabilitationseinrichtungen	7,6	7,5	7,3	7,4
• stationäre/teilstationäre Pflege	12,2	14,9	18,1	18,8
Rettungsdienste	1,7	2,1	2,6	2,6
Verwaltung	11,0	12,7	14,6	14,5
Sonstige Einrichtungen und private Haushalte	6,3	7,4	7,3	7,3
Ausland	0,6	0,6	0,9	1,0
Investitionen	7,2	8,3	9,2	9,0
Gesamt	186,5	212,4	239,3	245,0

Tab. 3-6.4 Kostenstruktur in Mrd Euro der Gesundheitsausgaben nach Einrichtungen⁶

Lage:

Wie Modellrechnungen des Statistischen Bundesamtes (Destatis) zeigen, kann der absehbare demografische Wandel in Deutschland zu etwa 58% mehr Pflegebedürftigen und 12% mehr Krankenhausbehandlungen im Jahr 2030 im Vergleich zu heute führen. Die Zahl der Pflegebedürftigen dürfte von 2,1 Millionen auf 3,4 Millionen und die in Krankenhäusern behandelten Fälle von 17 auf 19 Millionen steigen. Ursache für diese Zunahmen ist die steigende Zahl an Älteren bei insgesamt sinkender Gesamtbevölkerung. Nach den Ergebnissen der aktuellen Bevölkerungsvorausberechnung

wird die Zahl der 60-Jährigen und Älteren bis 2030 um rund 38% von 20,5 Millionen auf voraussichtlich 28,4 Millionen Einwohner und die der über 80-Jährigen vermutlich sogar um 73% von 3,6 Millionen auf 6,3 Millionen ansteigen.

Die veränderte Bevölkerungsstruktur dürfte zukünftig zu einem deutlich höheren Anteil älterer Pflegebedürftiger führen: Während heute 53% der Pflegebedürftigen 80 Jahre und älter sind, könnten es im Jahr 2030 rund 65% sein. Die Zahl der Pflegebedürftigen in diesem Alter nimmt dabei von 1,1 Millionen auf etwa 2,2 Millionen im Jahr 2030 zu. In der hier zugrundeliegenden Basisvariante der Modellrechnung ist unterstellt, dass die altersspezifischen Pflegequoten im Jahr 2030 identisch mit denen von heute sind. Geht man hingegen davon aus, dass sich das Pflegerisiko entsprechend der steigenden Lebenserwartung in ein höheres Alter verschiebt, läge die Zahl der ab 80-jährigen Pflegebedürftigen bei 2,0 Millionen. Die Gesamtzahl der Pflegebedürftigen würde in diesem Modell etwas weniger stark auf 3,0 Millionen im Jahr 2030 ansteigen (Basisvariante: 3,4 Millionen).

Investitionsverhalten:

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen zum Investitionsverhalten im Gesundheitsbereich festhalten:

- Aufgrund der demografischen Entwicklung wird mit einem weiteren Anstieg des Leistungsvolumens zu rechnen sein, der tendenziell schneller anwachsen wird als die Mittel zu seiner Finanzierung.
- Entscheidendes Element bei der Bewertung von Investitionsvorhaben wird vor allem ihre Wirtschaftlichkeit sein. Aufgrund des engen finanzwirtschaftlichen Rahmens werden auch die Finanzierungsmöglichkeiten eine wesentliche Rolle spielen – hier wird davon ausgegangen, dass sich diese bei privaten Trägern besser darstellt als bei gesetzlichen.
- Qualitative Faktoren spielen zwar eine Rolle, werden jedoch erst relevant, wenn die absolute Wirtschaftlichkeit der Investition sichergestellt ist. Eine Ausnahme könnten Investitionsprojekte darstellen, die dazu beitragen dem Arbeitskräftemangel zu begegnen – entweder dadurch, dass sie bei vorhandenen Tätigkeiten entlasten oder diese komplett übernehmen.

⁶ Gesundheitsberichtserstattung des Bundes (2010) (www.gbe-bund.de)



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 4 MARKTDATEN

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Krankenhäuser“

Tabelle 3-6.5 ergänzt die obigen Marktstrukturdaten spezifisch mit Daten aus dem Bereich „Krankenhäuser“.

	Anzahl
Betriebe / aufgestellte Betten	2087 / 506 954
• davon öffentlich	677 / 250 345
• davon freigemeinnützig	790 / 177 632
• davon privat	620 / 78 977
• davon 1 – 599 Betten	1 937 / 359 818
• davon 600 – 799 Betten	64 / 43 654
• davon 800 und mehr Betten	86 / 103 482
Personal	792 299
• davon ärztlich	126 000
• davon Pflegedienst	298 325
• davon Hauspersonal, Verwaltung etc.	367 974
Personalbelastung (Betten je VZÄ)*	180
• Ärztlich	1 134
• Pflegedienst	479

*Vollzeit-Äquivalent

Tab. 3-6.5 Strukturdaten „Krankenhäuser“ 2007⁷.

Seit 1991 gibt es einen eindeutigen Trend in der deutschen Krankenhauslandschaft: Die Zahl der Einrichtungen ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich von 2 411 Häusern im Jahr 1991 auf 2 087 im Jahr 2007 zurückgegangen. Dies entspricht einem Rückgang um 324 Häuser bzw. um 13,4%. In diesem Zeitraum sind in den Krankenhäusern 158 600 Betten abgebaut worden. Die Zahl der Betten ist dadurch um fast ein Viertel auf 507 000 Betten zurückgegangen. Diese Entwicklung wurde – dem internationalen Trend in diesen Jahren folgend – maßgeblich vom Rückgang der durchschnittlichen Verweildauer der Patientinnen und Patienten beeinflusst. Lag die durchschnittliche Verweildauer im Jahr 1991 noch bei 14,0 Tagen, so ist sie bis zum Jahr 2007 auf durchschnittlich

8,3 Tage zurückgegangen. Insgesamt reichte der Bettenabbau in den Krankenhäusern nicht aus, um den Rückgang der Verweildauer der Patientinnen und Patienten auszugleichen und die Kapazitäten an veränderte Bedarfslagen anzupassen. Erstmals seit 1998 stieg in den Jahren 2006 und 2007 die Bettenauslastung gegenüber dem Vorjahr wieder an.⁸

4.1.3 Kostenstruktur der Krankenhäuser

Im Jahr 2007 betrugen die Kosten der Krankenhäuser insgesamt 68,1 Mrd Euro. Direkte Rückschlüsse darauf, ob und inwieweit darüber hinaus beispielsweise auch Effizienz- und Produktivitätsunterschiede der Einrichtungen oder die Struktur und die Schwere der Erkrankungen der Behandelten für Unterschiede im Kostenniveau ausschlaggebend sind, lassen sich auf der Basis der vorliegenden Daten jedoch nicht ziehen.

Die **Personalkosten** hatten 2007 mit 41,9 Mrd Euro einen Anteil von 61,6% an den Gesamtkosten der Krankenhäuser (ohne Kosten der Ausbildungsstätten und ohne Aufwendungen für den Ausbildungsfonds). Ärztlicher Dienst und Pflegedienst allein hatten zusammen einen Anteil von 60,4% an den gesamten Personalkosten. Die **Sachkosten** der Krankenhäuser lagen im Jahr 2007 bei 25,7 Mrd Euro. Knapp die Hälfte davon (12,2 Mrd Euro) entfiel auf Kosten für den medizinischen Bedarf. Innerhalb dieser Kostenart hatten Arzneimittel mit 24,0% bzw. 2,9 Mrd Euro den größten Anteil. Die **Verteilung der Brutto-Gesamtkosten** der Krankenhäuser (ohne Kosten der Ausbildungsstätten und ohne Aufwendungen für den Ausbildungsfonds) auf Personal- und Sachkosten hat sich in Richtung Sachkosten verschoben. 1991 wurden zwei Drittel (67,0%) der Brutto-Gesamtkosten für Personalkosten aufgewendet, 2007 waren es nur noch 61,6%. Eine Begründung dafür ist nicht etwa der geringere Personalaufwand, sondern die Verschiebung in die Sachkosten durch Personalleasing über Agenturen für das nicht-ärztliche Personal.

⁷ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden Statistisches Bundesamt (2008): Gesundheit. Grunddaten der Krankenhäuser 2007 (Fachserie 12 Reihe 6.1.1) (www.destatis.de).

⁸ Im Folgenden Spindler/Schelchase (2009): Krankenhauslandschaft im Umbruch (www.destatis.de).



CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 4 MARKTDATEN

Die **Sachkosten** der Krankenhäuser haben sich bis 2007 gegenüber 1991 annähernd verdoppelt (+ 93,8%). Die größten Kostensteigerungen ergaben sich für zentrale Verwaltungs- und zentrale Gemeinschaftsdienste (+ 189,7 bzw. + 175,5%). Im Vergleich dazu fiel die Kostenentwicklung im Bereich Lebensmittel (+ 36,1%) und im Bereich Wasser, Energie, Brennstoffe (+ 38,6%) unterdurchschnittlich aus.

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Serviceroboter-Anwendungsfall bezieht sich ausschließlich auf den Bereich „Krankenhaus“ mit einer bestimmten Betriebsgröße. Aus diesem Grund wird auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamts der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-6.6)⁹

- Statistisch relevanter Sektor ist die „Gesundheit“, Teilbereich „Krankenhaus“
- Die Serviceroboter-Anwendungsszenarien werden als Alternative zu einem FTS betrachtet. Diese werden erst in Krankenhäusern mit mehr als 600 Betten eingesetzt. Im Vergleich zum FTS reicht die Leistungsfähigkeit der Serviceroboter-Systeme nicht aus, um größere Krankenhäuser zu versorgen. Daher werden im Folgenden nur Einrichtungen mit einer Bettenanzahl von 600 – 800 Betten betrachtet.

	Krankenhäuser	Betten insgesamt
	2 087	506 954
davon mit 600 – 799 Betten	64	43 654

Tab. 3-6.6 Ableitung des relevanten Zielmarkts

9 Statistisches Bundesamt (2008): *Gesundheit. Grunddaten der Krankenhäuser 2007* (Fachserie 12 Reihe 6.1.1). (www.destatis.de).

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 64 Krankenhäuser als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-6.7):

Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme ist nicht direkt vorhanden. Aus den Daten des Gesundheitsberichts des Bundes geht jedoch hervor, dass 2006 ~9,0 Mrd Euro in Gebäude und Anlagen investiert wurden. Auf dieser Grundlage kann abgeschätzt werden, dass auf Krankenhäuser ~2 436,8 Mio Euro entfielen.¹⁰

- Als Bezugsgröße zur Abschätzung der Investitionen je Krankenhaus eignen sich die aufgestellten Betten. Bei 506 954 verfügbaren Plätzen ergibt sich demnach eine Investition von ~4 806,9 Euro/Bett. Bei einer Anzahl von 43 654 Betten ergibt sich eine Bruttoinvestitionssumme von ~209,8 Mio Euro in den hier betrachteten Krankenhäusern.
- Es wird geschätzt, dass etwa 10% dieser Summe in technische Ausrüstungen und Anlagen investiert werden (~21 Mio Euro).¹¹ Weiterhin wird geschätzt, dass davon wiederum 10% für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen könnten (~2,1 Mio Euro).¹²
- Zu beachten ist, dass jedes Serviceroboter-System aus 20 Servicerobotern besteht. Bei einem Systempreis von Tsd Euro 1 158 (SR-Variante A) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~ 40 Servicerobotern (2 Ser-

10 Schätzung basierend auf der Annahme, dass sich die Investitionen proportional zu den Ausgaben verhalten. Diese betragen 2006 im Bereich der stationären Pflege 63,9 Mrd Euro bei 236 Mrd Euro Gesamtausgaben im Gesundheitssystem (vgl. Tab. 3-6.4; ohne Investitionsanteil).

11 Ermangelung geeigneter Daten. Da angenommen wird, dass der Großteil der Investitionen in Gebäude bzw. gebäudespezifische Ausrüstungen investiert wird, werden die technischen Ausrüstungen auf einem niedrigen Niveau angesetzt.

12 Ermangelung geeigneter Daten. Da die SR-Lösungen keine bestehenden Geräte ersetzen und damit einen zusätzlichen Investitionsbedarf auslösen, der mit anderen Investitionsprojekten konkurriert, wird ein niedriger Anteil angesetzt.





01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 4 MARKTDATEN

viceroboter-Systeme) führen – was letztlich zu einer Installed Base von 480 Servicerobotern (24 Serviceroboter-Systeme) im eingeschwungenen Marktzustand führen würde (Lebensdauer 12 Jahre). Für SR-Variante B ergeben sich Werte von ~60 Servicerobotern (3 Serviceroboter-Systeme) pro Jahr bzw. 720 Servicerobotern (36 Serviceroboter-Systeme) als Installed Base.

- Aufgrund der positiven LCC-Betrachtung (*vgl. Abschnitt 3.1*) sind keine weiteren Abschläge auf das errechnete Marktpotenzial vorzunehmen. Es wird damit gerechnet, dass das Potenzial voll ausgenutzt wird.

Relevante Betriebe	~64
Brutto Investitionssumme (T€)	~209 839,3
• davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~20 983,9
• davon SR-Potenzial (T€)	~2.098,4
Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR-Systempreis T€ 1 158,3 / 864,5; 20 SR pro System)	
• errechnet	~40 / 60
• real (nur 1 SR-System pro Krankenhaus)	~40 / 60
Errechneter max. Bestand an SR 12 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
• errechnet	~480 / 720
• real (nur 1 SR-System pro Krankenhaus)	~480 / 720

Tab. 3-6.7 Ableitung des Marktpotenzials (Eigene Schätzungen).





01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zum konventionellen FTS darstellen – insbesondere weil sie schon heute das Potenzial haben, ihre Leistung zu erheblich günstigeren Prozesskosten (Kosten pro transportierten Container) als das konventionelle FTS zur Verfügung zu stellen. Auch die Anforderungen an den notwendigen Finanzierungsrahmen stellen sich erheblich günstiger dar.
- Einschränkend ist jedoch zu erwähnen, dass das hier beschriebene Anwendungsszenario nur für Krankenhäuser eine im Vergleich zum FTS günstigere Alternative ist, in welchen der Leistungsbedarf von 700 pro Tag zu bewegendenden Containern nicht überschritten wird. In allen anderen Fällen mit einem wesentlich höheren Bedarf an Transportleistung könnte das konventionelle FTS weiterhin die einzige, technisch abbildbare Automatisierungslösung darstellen (weil die konzipierten SR-Varianten in der Regel nicht die gleiche Transportleistung bringen können). In Fällen mit erheblich geringeren Transportvolumen werden wieder die rein manuellen Alternativen aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten relevant – wobei sich hier die „Wirtschaftlichkeitsgrenze“ für eine Automatisierung, die heute auf Basis eines FTS bei ca. 600 Containern am Tag liegt, durch den Serviceroboter-Einsatz signifikant verbessern wird.
- Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit den hier beschriebenen SR-Varianten für alle Anwendungsfälle, in denen eine Automatisierungslösung auf Basis eines FTS bisher nicht wirtschaftlich darstellbar war, nun doch wirtschaftlich automatisierbar erscheinen (somit „Mittelweg“ – also insbesondere solche Fälle, bei denen die zu bewegendende Container-Anzahl deutlich unter 600 liegt). Zusätzlich sollte beachtet werden, dass die Serviceroboter-Anwendung dem Nutzer zusätzlich Nutzwerte bereitstellt (wie Dokumentation, Hygiene, Arbeitsentlastung), die erheblich zu einer Qualitätsverbesserung der eigentlichen „Service-Leistung“ des Krankenhauses beitragen können und daher gerade

im „Grenzbereich“ einer wirtschaftlichen Anwendung die Investitionsbereitschaft positiv beeinflussen könnten.

- Vor diesem Hintergrund kann mit einer hohen Marktakzeptanz der Serviceroboter-Lösungen in mittelgroßen Krankenhäusern gerechnet werden – es wird davon ausgegangen, dass das errechnete Marktpotenzial langfristig voll ausgeschöpft wird und in diesem Bereich FTS-Systeme vollständig substituiert.

5.2 Forschungsbedarf

- Entwicklung von Software zur freien Navigation autonomer Systeme
 - Bisher erfolgt die Navigation in den beschriebenen Umgebungen vor allem anhand von Positionshilfen (Marker) entlang fester Bahnen. Für ein flexibles System muss Navigationssoftware geschaffen werden, die ein freies Navigieren in gegebenen Umgebungen ermöglicht.
 - Um diese Systeme wirtschaftlich produzieren zu können, ist dabei der Einsatz alternativer, kostengünstiger Sensorensysteme vorzusehen.
 - Die Navigationssoftware muss in der Lage sein, aus den erhaltenen Umgebungsinformationen und der zugrunde liegenden Basisinformation freie Abstellflächen für Objekte (zur Aufnahme wie auch Abgabe von Objekten) zu ermitteln und entsprechend anzufahren.
- Entwicklung von kostengünstigen Sensorsystemen
 - Heute am Markt befindliche Sensoren sind laserbasiert und vergleichsweise teuer. Für eine wirtschaftliche Nutzung sollen kostengünstige Alternativen geschaffen werden.
 - Ein Ansatz ist der Einsatz von kamerabasierten Systemen, da Kameras kostengünstig und in einem hohen Reifegrad bereits am Markt verfügbar sind. Entsprechende, stabile Softwaresysteme für den verlässlichen Einsatz in Alltagsumgebungen fehlen derzeit.





01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 5 FAZIT

- Entwicklung von Software zur Detektion und Verfolgung beliebiger Objekte
 - Zur freien Navigation sind die Vermeidung und somit auch das Umfahren von statischen und dynamischen Hindernissen erforderlich. Es werden Softwaremodule zur verlässlichen Detektion und effizienten Umfahrung dieser Hindernisse benötigt. Dies sollte dann entsprechend auf den oben genannten kostengünstigen Sensoren basieren.
 - Zur freien Aufnahme und Abgabe von Objekten können heute am Markt befindliche Techniken, wie z.B. RFID Technologie genutzt werden. Zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit ist jedoch das Erkennen von zu transportierenden Objekten sinnvoll.





01

02

03

04

05



06

07

08

09

10

11

CONTAINERTRANSPORT IM KRANKENHAUS

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B
• Laserscanner	7 000 €	-
• 3D-ToF	4 800 €	-
• Kamera	-	500 €
• Mobile Basis (Diff. Antrieb)	32 000 €	32 000 €
Infrastruktur (Bedienterminals auf Station)	15 000 €	15 000 €

Tab. 3-6.8 Anschaffungskosten für ein Fahrerloses Transportsystem (FTS) mit Serviceroboter-Komponenten



SZENARIOSTECKBRIEF

FASSADENREINIGUNG



07



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG



FASSADENREINIGUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Die Fassadenreinigung in Abb. 3-7.1 ist nachfolgend sowohl als Anwendungsfalldiagramm als auch als Sequenzdiagramm hinterlegt. In diesem konkreten Fall sind die Fassaden nicht vom Boden aus erreichbar, da die Innenhöfe nicht mehr zugänglich sind (Altbauten!).



Abb. 3-7.1 Industrie-Kletterer beim Reinigen einer Fassade.
Bildrechte gemäß Wikimedia Commons, lizenziert unter GNU/Lizenz für freie Dokumentation, URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Meierbau_cleaning.JPG

Weiterhin sind hier kaum Synergieeffekte durch Inanspruchnahme verschiedener Dienstleistungen nutzbar, da ein Unternehmen üblicherweise ausschließlich für die

Reinigungsdienstleistung beauftragt wird. Während des Reinigens bewegt sich der Industrie-Kletterer über die Fassade, um seiner Reinigungsaufgabe nachzukommen. Dabei muss er von Zeit zu Zeit auch sein Seilzeug umhängen, um andere Fassadenbereiche erreichen zu können.

1.2 Probleme

- Einführung eines Mindestlohns im Bereich der Gebäudereinigung ändert das Preisgefüge. Die gleiche Dienstleistung wird dadurch entweder teurer oder die Leistung sinkt bei gleichem Preis.
- Heutiger Stundensatz: ca. 6 – 8 Euro Mindestlohn im Westen für 2010: 11,13 Euro, im Osten: 8,66 Euro; für 2011 im Westen: 11,33 Euro, im Osten: 8,88 Euro, also Steigerung der Lohnniveaus ab 2010, der Einsatz von Automatisierungslösungen im Allgemeinen bzw. Robotiklösungen im Speziellen kann schneller rentabel werden.
- Problematisch sind auch die Flüchtigkeit der Dienstleistung und damit deren Nachweis. Beispielsweise kann ein Fenster korrekt gereinigt worden sein, zu einem späteren Zeitpunkt aber wieder verschmutzt werden (Regen, Umwelteinflüsse).

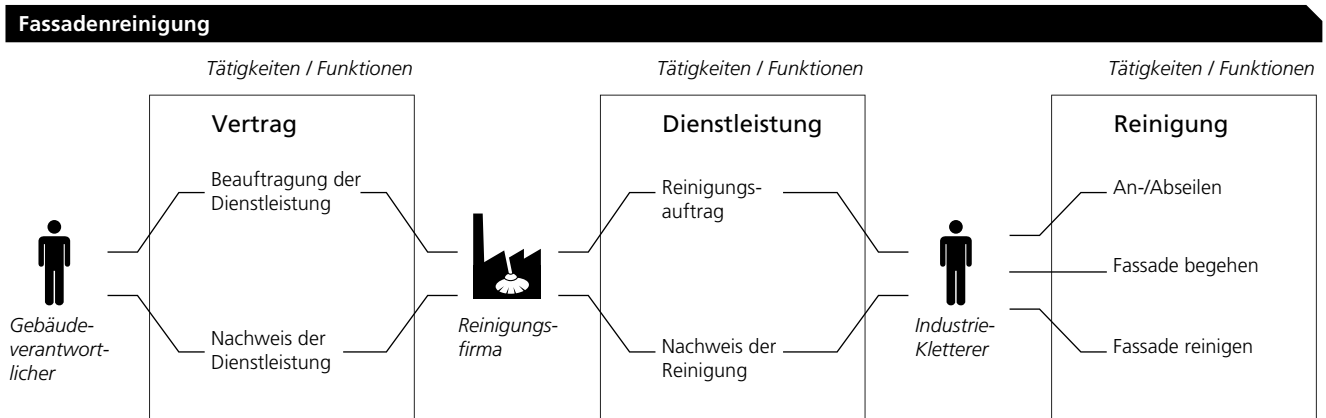


Abb.3-7.2 Beauftragung und Nachweis der Dienstleistung.



01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Sequenzdiagramm

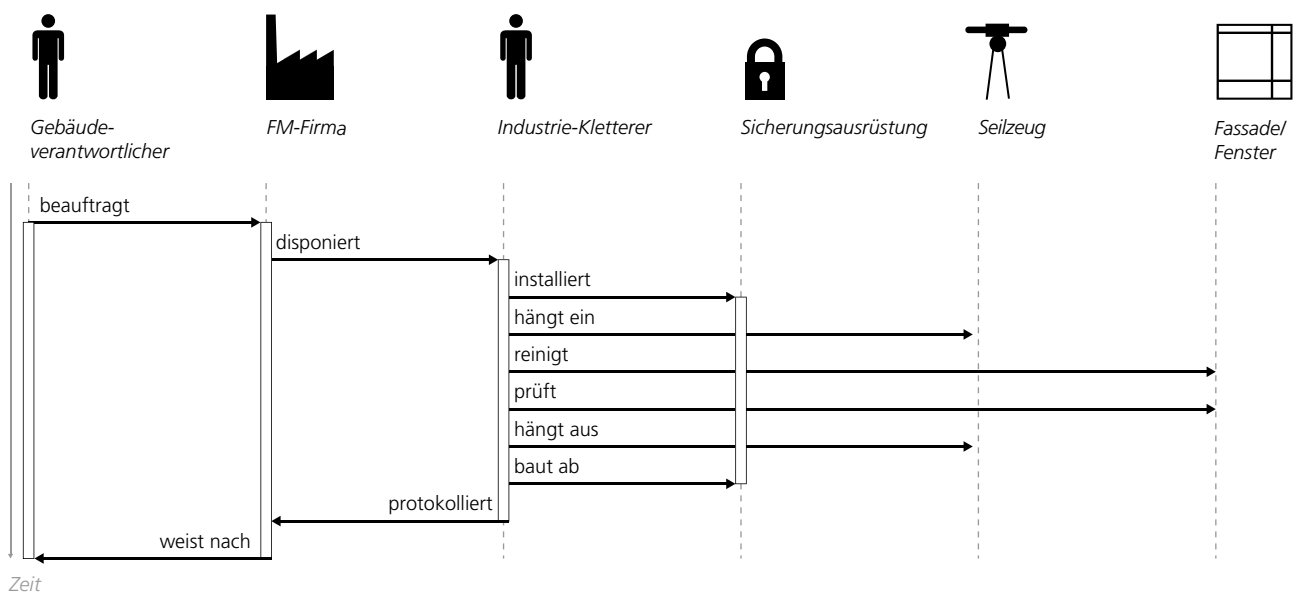


Abb. 3-7.3 Sequenzdiagramm der heutigen Fassadenreinigung.

- Der Nachweis der korrekten Reinigung ist an dieser Stelle unter Umständen schwierig. Ein Serviceroboter könnte die objektive Nachvollziehbarkeit der Durchführung, Prüfung und Dokumentation realisieren.
- Ein weiterer Punkt ist das reduzierte Gefährdungspotenzial bei Servicerobotern.

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

- Sicherstellen eines kontinuierlichen Reinigungsprozesses, auch bei ggf. Output-orientiertem Service-Level, durch fest am Gebäude installierte Anlagen
- Gefahrenminderung: Absturz eines Roboters ist eher verkraftbar als der eines Menschen; betrifft sowohl ethische Fragestellungen als auch die Betrachtung von Folgekosten
- Kalkulierbarkeit der Kosten durch deterministische Planbarkeit des Einsatzes
- Objektive Nachweisbarkeit der Dienstleistung
- Reduzierung der Wetter- und Tageszeitabhängigkeit

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Untergliederung des Facility Management (FM), auch Gebäudemanagement genannt – gemäß DIN 32736 (August 2000) in

- Technisches Facility Management
- Infrastrukturelles Facility Management
- Kaufmännisches Facility Management

Nur ca. 20% der Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs, LCC) eines Gebäudes fallen während der Entstehung an, die restlichen 80% während des Bestehens des Gebäudes. Da die Unterhaltskosten auch zu einem wesentlichen Anteil aus Kosten für das Facility Management bestehen, entfällt somit ein relevanter Anteil daraus auch auf das Facility Management. Für die Erbringung der Reinigungsdienstleistung lässt sich zwischen Input-orientierten Service-Levels und Output-orientierten Service-Levels unterscheiden.



FASSADENREINIGUNG

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

- Input-orientierte Service-Level: z.B. Bestellung von 5 mal Reinigen pro Woche
- Output-orientierte Service-Level: z.B. Reinigen nach Bedarf

Problem: Die Qualität der erbrachten Dienstleistung muss nachgewiesen werden. In der aktuellen Preispolitik, wo über Ausschreibungen stets der günstigste Anbieter beauftragt wird, können Input-orientierte Service-Level beim Technischen FM kaum mit der erforderlichen Qualität durchgeführt werden. Wichtig für den Zielmarkt ist die Zeitdauer für Amortisationen von FM-bezogenen Anschaffungen, da die FM-Branche insgesamt als investitionsarm gilt. Ein vollständiger Return-on-Invest muss üblicherweise nach ca. 3 Jahren erfolgt sein. Einige Anbieter beurteilen Investitionen auch über die gesamte Vertragslaufzeit eines betreuten Gebäudes, die zwischen einem und bis zu 10 – 15 Jahren liegen kann.¹

1.4.2 Einsatzbereich

Betrachtet wird im Weiteren das Infrastrukturelle FM. Hier kommt meist die Interaktion mit der Umgebung ohne komplexe, kognitive Fähigkeiten des Menschen aus. Das Infrastrukturelle FM wird üblicherweise von spezialisierten Dienstleistern durchgeführt, die sich auf einzelne Bereiche fokussiert haben.

- Relevanter Kostentreiber: Lohnkosten, ca. 6-8 Euro/Stunde und Person
Bereich Reinigung: mehr als 80% der Kosten sind fix und nicht steuerbar².
Im Jahr 2007 beliefen sich die Personalaufwendungen von Unternehmen im Bereich Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln (ab 250 000 Euro Umsatz) auf knapp 6 Milliarden Euro pro Jahr³.
- Schwer zugängliche Fassaden und Wände, ggf. in großen Höhen
- Etwas höheres Lohnniveau bei Industrie-Kletterern als bei der Bodenreinigung

² Bei gleichbleibendem Input-orientiertem Service-Level, also der gleichen Menge an beauftragter Arbeit können durch die Einführung des Mindestlohns und den kleinen Anteil an technischen Einrichtungen (also Investitionen) die Kosten nur sehr bedingt gesteuert werden.

³ Quelle: Statistisches Bundesamt Deutschland, GENESIS-Online.

¹ Gemäß Aussagen aus verschiedenen Expertengesprächen.





FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

Sequenzdiagramm

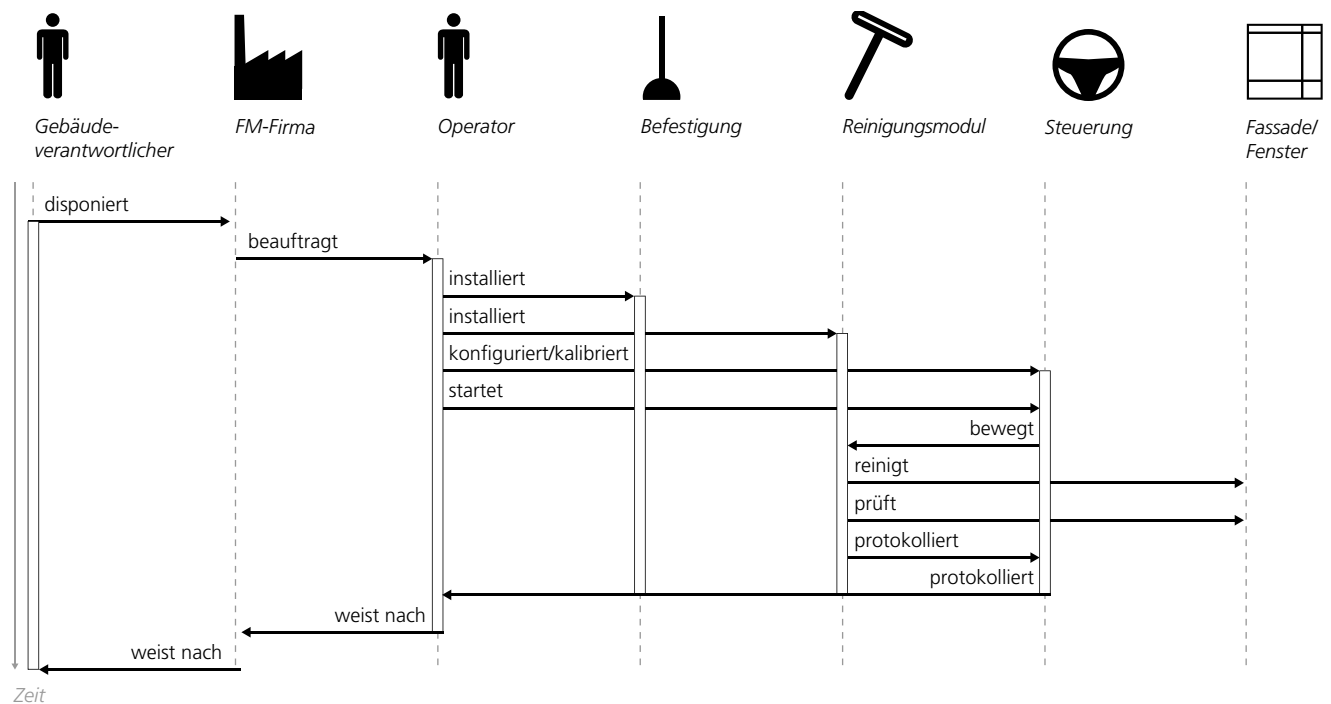


Abb. 3-7.4 Sequenzdiagramm des Reinigungsroboters.

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Roboter kann gezielt einzelne Bereiche wie z.B. Fenster anfahren.

- Reinigung der angefahrenen Bereiche
- Unterscheidung der Reinigungsprozesse und -medien für verschiedene Fassaden, Fenster, etc.
 - Bürsten
 - Hochdruck-Reinigung mit Flüssigkeit; ggf. schnelles Verdampfen/Verdunsten des Reinigungsmediums, unter Umständen auch als Nebel
 - Sandstrahlen
 - Eiskristalle mit kalter Luft (nach dem Prinzip des „Sandstrahlens“)
 - Ultraschall

- Im Bereich von Personenverkehr unter der Reinigung muss sichergestellt sein, dass kein Wasser/Abwasser/Reinigungsmedium herabtropfen kann. Stattdessen muss für nicht-flüchtige Medien das gesamte Auffangen oder ein geschlossener Kreislauf sichergestellt sein.
- Die Befestigung kann ggf. nach der Reinigung am Gebäude verbleiben, um deren Installation beim nächsten Reinigungseinsatz überspringen zu können. Dann ist nur eine erneute Kalibrierung der Steuerung erforderlich.

2.2 Roboterentwurf

Das Grundkonzept besteht aus vier Seilwinden, die in den vier Ecken der Fassade montiert sind. Über die vier Seile oder Bänder wird das Reinigungsmodul an der Fassade abgespannt.



01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Durch Verlängern oder Verkürzen der einzelnen Seile/Bänder kann die Position des Reinigungsmoduls variiert werden.

Das Reinigungsmodul selbst besteht aus einem Roboterarm, der der eigentlichen Reinigungstechnik die Kompensation der fehlenden Freiheitsgrade (Verkippen und Verdrehen) ermöglicht sowie auch das flächendeckende Reinigen an Vorsprüngen und Hinterschneidungen erlaubt. Das Reinigungsmodul ist über z.B. Karbonstäbe gegen die Fassade selbst vorgespannt, um trotz der drei Freiheitsgrade (horizontal und vertikal entlang der Fassade und Verdrehen in der Fassaden-Ebene) eine Kraft senkrecht zur Fassade aufbauen zu können. Über bewegliche, vorgespannte Füße an den Karbonstäben, die auf der Fassade aufliegen, kann das Reinigungsmodul bei synchronisierter Reduzierung der Seilvorspannung der unteren Seile von der Fassade gelöst und an anderer Stelle wieder angedrückt werden.

Der Fassadenreinigungsroboter wird über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle einmalig trainiert. Dabei wird üblicherweise von einem CAD-Modell der Fassade ausgegangen. Der Benutzer gibt dabei vor, welche Teile der Fassade (Fenster, Fensterrahmen, Vorsprünge, ...) gereinigt werden sollen. Mittels gängiger Verfahren aus der Fertigungstechnik kann automatisch ein Verfahrensprogramm generiert werden, das beispielsweise mäanderförmig die Fassade überstreicht. Beim Ausführen dieses Programms erfolgt stets eine reaktive Kollisionsvermeidung mit Hilfe von Näherungssensoren, um sowohl in den CAD-Daten nicht vermerkte Hindernisse zu umgehen als auch bei der Kalibrierung zu unterstützen.

Das gesamte Robotersystem mit Ausnahme der Aufnahmen für die Seilwinden kann komplett demontiert werden, um es an anderen Fassaden einzusetzen und so die Auslastung zu erhöhen. In diesem Fall muss eine erneute Kalibrierung vor jedem erneuten Reinigungsdurchlauf erfolgen.

Fassadenreinigungsroboter

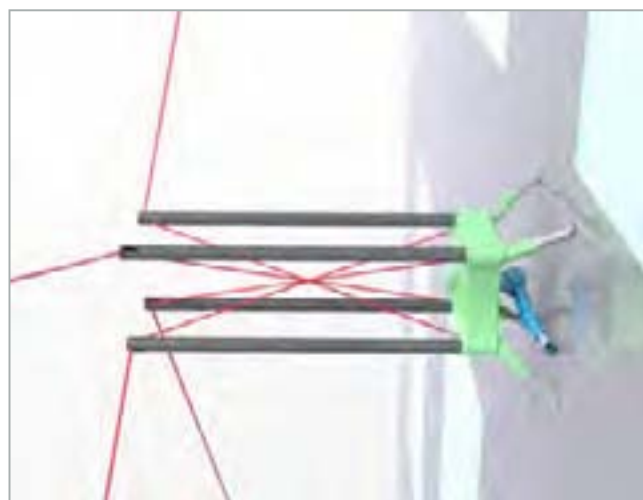


Abb. 3-7.5 Beispiel eines Fassadenreinigungsroboters, über Seile abgespannt.





FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

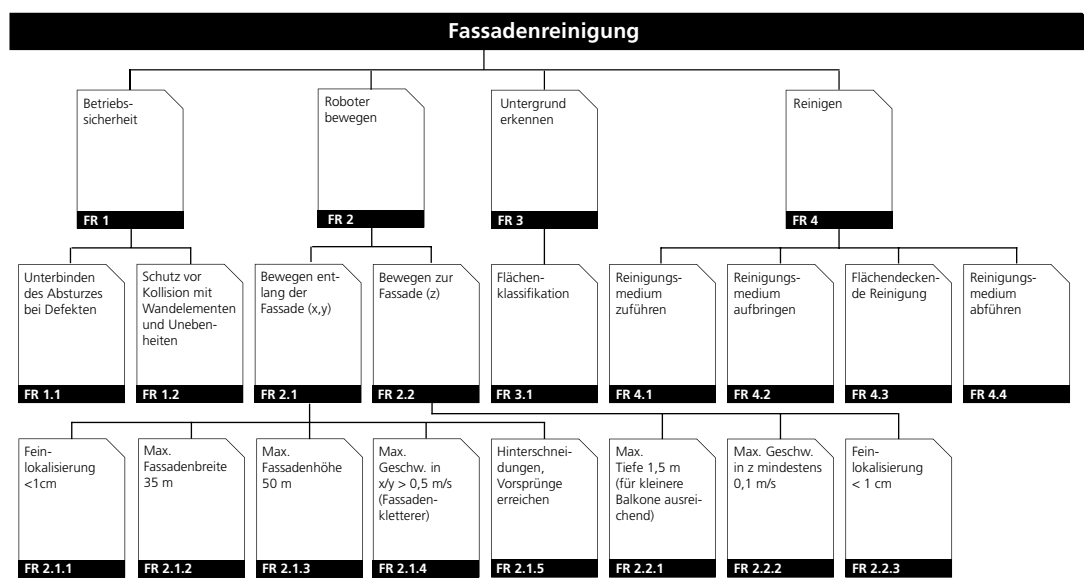


Abb. 3-7.6 Axiomatic Design – Functional Requirements.

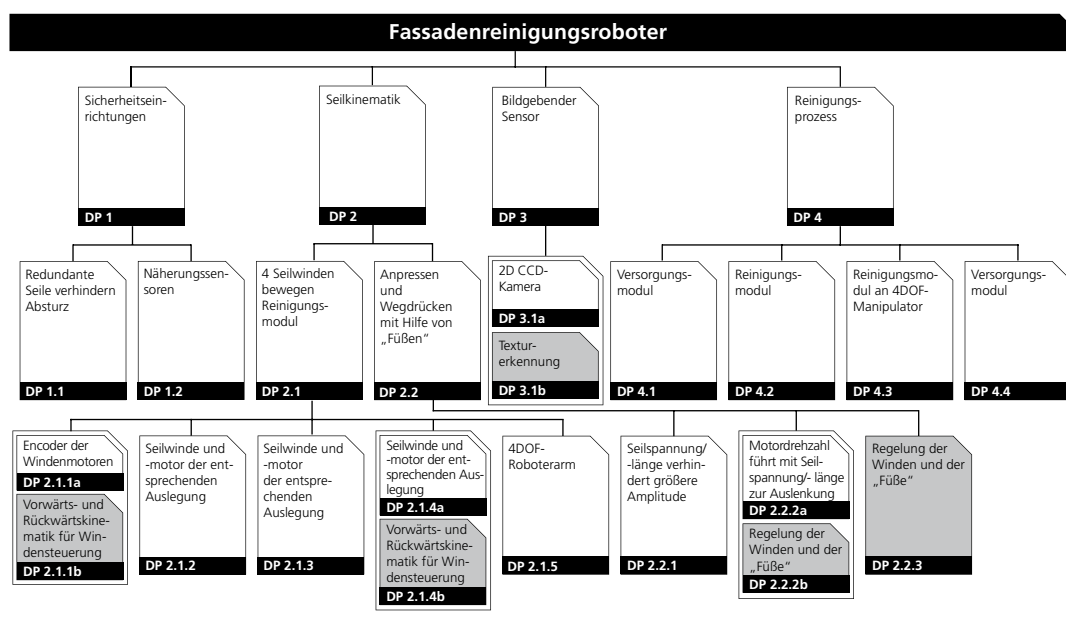


Abb. 3-7.7 Axiomatic Design – Design Parameters.



FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

- Eine Reinigungseinheit, die mit vier Seilen an der Gebäudefront abgespannt wird. Die Abmessungen werden in diesem Konzept mit ca. 1 x 1 m² angenommen, die Beschleunigung (positiv und negativ) der Reinigungseinheit über die Winden muss ca. 1 g erreichen, um während des Ablöseimpulses durch die Karbonfüße eine ausreichende Positionsänderung hervorrufen zu können.
- Die Reinigungseinheit wird in horizontaler und vertikaler Richtung durch die Bewegung der Seilwinden über die Gebäudefront bewegt.
- Karbonstangen zum Aufbringen des Anpressdrucks.
- Reinigung wird ausschließlich von der Reinigungsmimik durchgeführt, die über einen Leichtbauroboterarm an der Reinigungseinheit angebracht ist.
- Roboterarm zum präzisen Führen des Reinigungsendeffektors (d.h. ±1 cm in allen drei Raumrichtungen) und zum Ausgleich von Neigung und Verdrehung der Reinigungseinheit.

2.2.1.1 Seilkinematik

TRL / € / FR-Diagramm

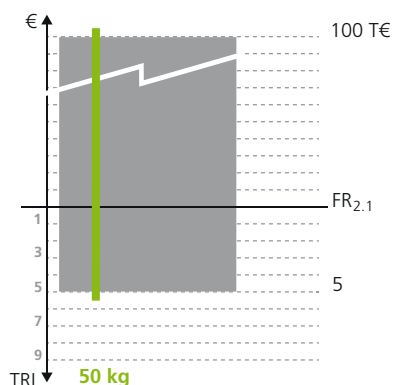


Abb. 3-7.8 Seilkinematik zum Bewegen des Reinigungsmoduls (bis 50 kg Traglast).

Die Seilkinematik existiert als Laboraufbau mit 8 Seilen ^{4,5}, wurde jedoch bisher nicht an Gebäudefassaden mit 4 Seilen installiert. Bisheriger Fokus waren zum einen Pick-and-Place-Anwendungen mit hohen Beschleunigungen, zum anderen die Solarzellenmontage, bei der ein Leichtbauroboterarm durch die 8-Seil-Kinematik bewegt wird⁶. Ein weiterer Demonstrator zum Bestücken von Hochregallagern, bei dem 4 Seilwinden zum Einsatz kommen, ist derzeit in Vorbereitung.

2.2.1.2 Reinigungsmodul

TRL / € / FR-Diagramm

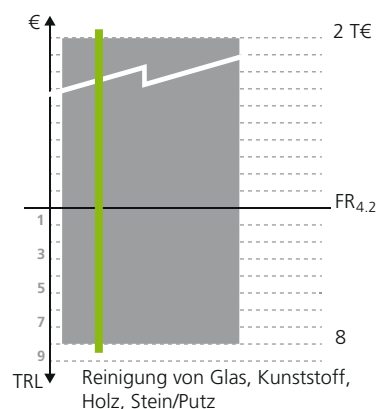


Abb. 3-7.9 Reinigungsmodul für verschiedene Oberflächen.

Die Reinigungstechnik existiert für dedizierte Oberflächen und

4 Miermeister, P.; Pott, A.; Verl, A.: *Dynamic Modeling and Hardware-In-The-Loop Simulation for the Cable-Driven Parallel Robot IPAnema*. In: Neumann, K. (Ed.); Schraft, R.D. (Chairman); Berns, K. (Chairman); International Federation of Robotics: Joint International Conference of ISRI/ROBOTIK2010: Munich, 7-9 June 2010. Berlin; Offenbach: VDE-Verlag, 2010, pp. 1288-1295.

5 Pott, A.; Meyer, C.: *Automated handling of concrete elements using wire robots: Winches operated in a coordinated fashion open up new streamlining potentials*. In: BFT International. 75 (2009), Nr. 7, pp. 28-31.

6 Pott, A.; Meyer, C.; Verl, A.: *Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots*. In: Neumann, K. (Ed.); Schraft, R.D. (Chairman); Berns, K. (Chairman); International Federation of Robotics: Joint International Conference of ISRI/ROBOTIK2010: Munich, 7-9 June 2010. Berlin; Offenbach: VDE-Verlag, 2010, pp. 999-1004.



FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

wird in Reinigungsmaschinen eingesetzt. Dieses Diagramm geht davon aus, dass die verschiedenen Reinigungstechniken nicht in einem einzigen Modul integriert sind. Für den Einsatz in der Seilkinematik liegen Anforderungen vor, die denen in mobilen Reinigungsmaschinen ähnlich sind (wie beispielsweise Scheuersaugmaschinen, z.B. der Firma Kärcher⁷) und mobilen Robotern (z.B. iRobot Scooba⁸). Jedoch gibt es bisher keine industriell einsetzbaren Lösungen, die integriert verschiedene Oberflächen reinigen können und in Leichtbauweise ausgeführt sind. Für solch einen integrierten Ansatz verschiedener Oberflächen in einem System ist der Technology Readiness Level niedriger anzusetzen.

sind verschiedene Medien über eine Zuleitung zuzuführen. In diesem Konzept wird angenommen, dass 0,3 l/min Reinigungsmedium zu- und wieder abgeführt werden muss.

2.2.1.4 4 DOF-Roboterarm

Der Roboterarm für Ausgleichsbewegungen und Erweiterung des Arbeitsraums wird aus einzelnen Dreh- und Kippmodulen zusammengefügt. Zu berücksichtigen ist die Minimierung des Gewichts, um die bewegte Masse des Reinigungsmoduls zu gering zu halten.

2.2.1.3 Versorgungsmodul

TRL / € / FR-Diagramm

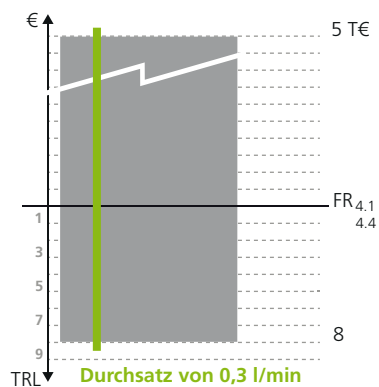


Abb. 3-7.10 Versorgungsmodul für Medien.

Die Medienversorgung muss – je nach eingesetztem Prozess – dezentral erfolgen, da die Reinigungseinheit nicht die Gesamtmenge an Medien für einen ganzen Reinigungsablauf (z.B. pro Fassade) on board mitführen kann. Das würde zu einem zu großen Gewicht führen. Abhängig vom Reinigungsprozess

7 http://www.kaercher.de/de/Produkte/Professional/Scheuersaugmaschinen/Handgefuehrte_Scheuersaugmaschinen.htm, abgerufen am 21.10.2010.

8 <http://www.iroboteuropa.de/section?secid=39818>, abgerufen am 21.10.2010.



FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/derzeitige Hemmnisse
FR 1.1 Unterbinden des Absturzes bei Defekten	Es darf kein Versagen auftreten, sonst Gefahr für Menschen	DP 1.1 Redundante Seile	300 €	9	2	-
FR 1.2 Schutz vor Kollision mit Wanelementen und -unebenheiten	Es darf kein Versagen auftreten, sonst Defekte an System oder Fassade wahrscheinlich	DP 1.2 Näherungssensoren	1 200 €	9	1	Annahme 4 Stück
FR 2.1.1 Feinlokalisierung	< 1 cm	DP 2.1.1a Encoder in den Windenmotoren	In Motoren enthalten	9	2	-
		DP 2.1.1b Vorwärts-/ Rückwärtskinematik		5	2	Robustheit gegenüber Fehler, Performanz
FR 2.1.2 Max. Fassadenbreite	Fassadenbreite < 35 m	DP 2.1.2 Seilwinde und Motor	100 000 €	5	1	Durchhängekom- pensation des Reinigungskopfes
FR 2.1.3 Max. Fassadenhöhe	Fassadenhöhe < 50 m	DP 2.1.3 Seilwinde und Motor				Siehe FR 2.1.2
FR 2.1.4 Max. Geschwindigkeit in x,y	Geschwindigkeit x,y > 0,5 m/s	DP 2.1.4a Seilwinde und Motor				Siehe FR 2.1.2
		DP 2.1.4b Vorwärts-/ Rückwärtskinematik		6	1	-
FR 2.1.5 Hinterschneidungen, Vorsprünge erreichen		DP 2.1.5 4DOF-Roboterarm	20 000 €	8	1	Eigengewicht des Arms
FR 2.2.1 Max. Bewegungstiefe in z-Richtung	> 1,5 m	DP 2.2.1 Abspannung über Karbonstäbe	1 000 €	3	2	Nachweis der Machbarkeit in dieser Anwendung
FR 2.2.2 Max. Geschwindigkeit in z-Richtung	> 0,1 m/s	DP 2.2.2a Motordrehzahl führt mit Seilspannung/-länge zur Auslenkung		4	1	Nachweis der Machbarkeit in dieser Anwendung
		DP 2.2.2b Regelung der Winden und der „Füße“		4	1	Nachweis der Machbarkeit in dieser Anwendung

>>



FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/derzeitige Hemmnisse
FR 2.2.3 Feinlokalisierung	< 1 cm	DP 2.2.3 Regelung der Winden und der „Füße“		4	2	Aufbau in dieser Dimension ist bisher nicht getestet
FR 3.1 Flächenklassifikation	gemäß der Menge an definierten reinigbaren Oberflächen	DP 3.1a 2D CCD-Kamera	500 €	9	1	-
		DP 3.1b Texturerkennung		4	1	Robustheit gegenüber wechselnden Licht- und Umwelteinflüssen, Verschmutzung der Oberflächen
FR 4.1 Reinigungsmedium zuführen	Menge ausreichend für Prozess	DP 4.1 Versorgungsmodul	5 000 €	8	1	Minimierung des Medienzuflusses über Zuleitung
FR 4.2 Reinigungsmedium aufbringen	typische Fassadenstrukturen	DP 4.2 Reinigungsmodul	2 000 €	8	2	Integration verschiedener Reinigungstechniken; Nachweis der Funktionalität
FR 4.3 Flächendeckende Reinigung	typische Fassadenstrukturen	DP 4.3 Reinigungsmodul an 4DOF-Roboterarm	22 000 €	8	1	Leichtbautechnologie
FR 4.4 Reinigungsmedium abführen	Menge abhängig vom Prozess	DP 4.4 Versorgungsmodul	5 000 €	8	2	Siehe FR 4.1

SR-Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/derzeitige Hemmnisse
FR 2.2 Bewegen zur Fassade (z)		DP 2.2 Propellerantrieb	2 000 €	8	1	Nachweis der Anwendbarkeit
FR 2.2.2 Max. Geschwindigkeit in z-Richtung	> 0,1 m/s	DP 2.2.2b Regelung der Winden und der Propellerdrehzahl		5	1	Nachweis der ausreichenden Genauigkeit

Tab. 3-7.1 Komponentenübersicht



FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.2 Software

Die Software des Fassadenreinigungssystems besteht im Wesentlichen aus drei Kernkomponenten: der Kinematiksteuerung, der Untergrunderkennung und der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die Kinematiksteuerung beinhaltet neben der Vorwärts- und der Rückwärtskinematik zur Ansteuerung des Reinigungsmoduls auch Benutzerschnittstellen zur Bestimmung des Reinigungsbereichs sowie allgemein zur Bedienung des Robotersystems.

- Steuerung der Seilkinematik existiert
 - basierend auf Vorgängerprojekten am Fraunhofer IPA
 - Kalkulation basierend auf ROS

Die Untergrunderkennung sorgt zum einen für die Auswahl des korrekten Reinigungsverfahrens, zum anderen bietet sie auch eine zusätzliche Sicherheit bzw. Verfeinerung der Lokalisierung in der Kinematikberechnung.

- Untergrunderkennung
 - Auch hier ist die Software im Wesentlichen wiederverwendbar und daher nur zu parametrieren.
 - basierend auf ROS
 - basierend auf Vorgängerprojekten am Fraunhofer IPA

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle stellt eine Oberfläche für den Anwender zur Verfügung, damit zum einen die Reinigungsdurchläufe gestartet und überwacht, zum anderen aber auch die Reinigungsprogramme autonom und/oder assistiert erstellt werden können. Dabei kann ein CAD-Modell der Fassade als Basis für die Generierung des Verfahrensprogramms verwendet werden. Es erfolgt aber stets ein Abgleich mit der reaktiven Kollisionsvermeidung. Somit werden Abweichungen vom CAD-Modell detektiert. Auch ohne CAD-Modell wird dem Benutzer eine einfach zu bedienende Oberfläche zur Verfügung gestellt, mit der mit mäßigem Aufwand neue Reinigungsprogramme assistiert erstellt werden können.

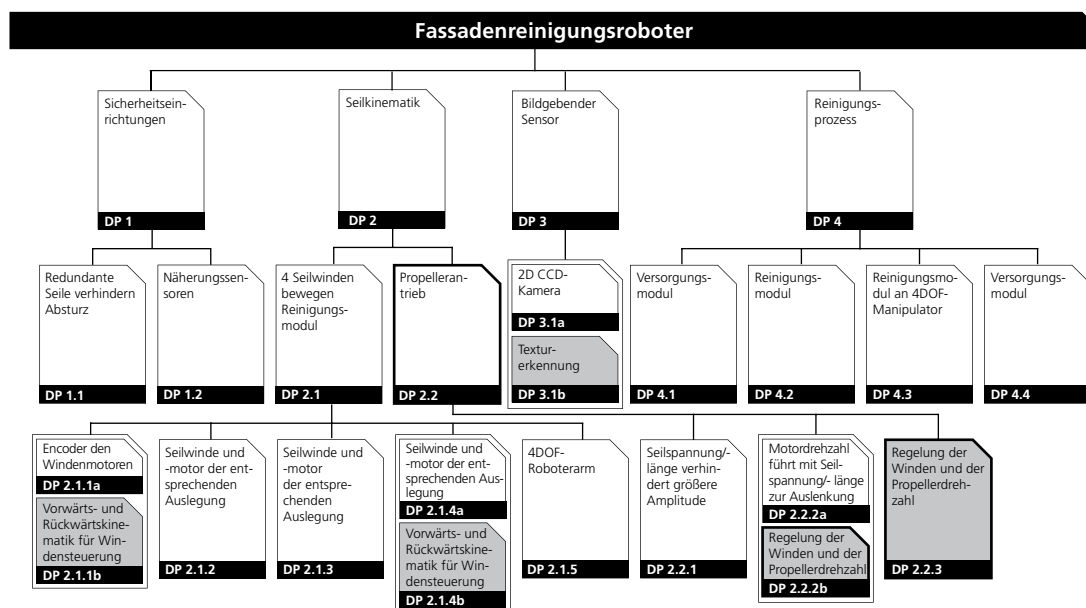


Abb. 3-7.11 Axiomatic Design – Design Parameters der SR-Variante B.



01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.3 SR-Variante B

Um ein mögliches Abkippen der Reinigungseinheit zu verhindern, wird bei dieser Variante statt der FüÙe ein Propellerantrieb eingesetzt. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um einen elektrisch angetriebenen Propeller mit ca. 2 kW Leistung, der für den notwendigen Schub sorgt. Das Prinzip ist in Abbildung 3-7.12 dargestellt. Ggf. kann dieses Konzept auch mit einer Vakuumvorrichtung kombiniert werden, um den Schub beim Erreichen der Fensteroberfläche minimieren zu können.

Die Functional Requirements der SR-Variante B stimmen mit SR-Variante A überein und werden deshalb hier nicht erneut aufgeführt.

Grundsätzlich wird die Reinigungseinheit bei dieser Variante im Gegensatz zur SR-Variante A durch die Seilkinematik in einer gewissen Distanz zur Fassadenoberfläche gehalten. Der Propellerantrieb wirkt der Kraft der Seilkinematik entgegen.

Propellerantrieb

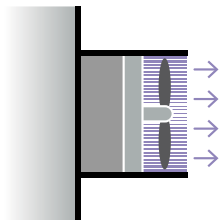


Abb. 3-7.12 Schematischer Propellerantrieb für z-Bewegung.

TRL /€ /FR-Diagramm

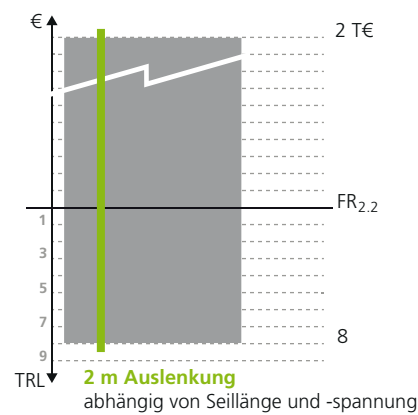


Abb. 3-7.13 Propellerantrieb für Antrieb in z-Richtung.

Die Summe aus Saugeffekt und Seilkraft muss demnach größer sein als der Propellerschub und der Rückstoßeffekt des eingedüsten Reinigungsmittels.

Die zur Fassade gewandte Frontseite enthält für die Fensterreinigung einen Bürstenvorhang, durch den Umgebungsluft angesaugt und nach hinten ausgestoßen wird. Mit Hochdruck eingesprühtes Wasser erhöht den Reinigungsgrad. Dieses Wasser wird durch den Propeller verwirbelt und nach hinten abgesprüht.





FASSADENREINIGUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status Quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Manuelle Alternative	
Grunddaten Use Case						
• Lebensdauer (a)		7		7		7
• Anzahl Roboter (System)		1		1		-
• Eff. Produktivzeit (h/a)		1 325		1 325		1 325
• Personalstunden (h/a)		0		0		1 325
• Serviceleistung (h/a)		1 325		1 325		1 325
LCC-Summe (T€)	1 190,3	100%	1 192,0	100%	380,3	100,0%
• Investition	177,6	14,9%	178,9	15,0%	9,0	2,4%
• Installationskosten	372,0	31,3%	372,0	31,2%	50,2	13,2%
• Aktivitätskosten	23,7	2,0%	23,7	2,0%	316,1	83,1%
• Wartung/Instand.	617,1	51,8%	617,5	51,8%	5,0	1,3%
• Andere	-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)	-995,2		-996,8		-282,5	
Softwarekosten (T€)	4 273,1		4 273,1		-	
Sonstige Entwicklungskosten	130 000		110 000		-	
Leistungskosten (€/h)	128,4		128,5		41,01	

Tab. 3-7.2 LCC.

Erläuterungen zu Tabelle 3-7.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tabelle 3-7.2 ausgehend von der SR-Variante A beschrieben. SR-Variante B wird hier nicht verglichen, da die Kostenstruktur mit SR-Variante A vergleichbar ist.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Robotersystems ausgegangen (365 Tage). Das System wird in einem Einschicht-Modell bei 16 h Schichtdauer eingesetzt. Zum reinen Betrieb ist keine weitere Person notwendig.⁹ Es wird angenommen, dass der Roboter in diesem Schichtmodell für ein Gebäude ~16 Tage braucht (3 Tage Einrichtung inklusive Transfer, 1 Tag Produktivzeit für Reinigung, 4 Gebäudeseiten, ~23 Gebäude pro Jahr). Daraus ergibt sich eine theoretische Produktivzeit von 1 472 h/a (Volllast) – da jedoch die technische Verfügbarkeit

des Systems mit 90% angesetzt wird, ergibt sich eine effektive Produktivzeit von 1 325 h/a. Die effektive Produktivzeit des Systems entspricht der Serviceleistung, die dem Kunden in Rechnung gestellt werden kann.

Manuelle Alternative: Zum Vergleich mit der SR-Variante wird davon ausgegangen, dass die Industrie-Kletterer voll ausgelastet sind. Dementsprechend werden hier nur die Kosten für eine mit der SR-Variante vergleichbare Arbeitsleistung angesetzt (~1 325 h/a) und mit einem entsprechenden Kostensatz verrechnet.

Investition: Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (129,7 Tsd Euro pro Roboter) – hinzu kommt ein 30%iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators. Weiterhin fallen pro Gebäude 6 900 Euro für die notwendigen Seilsicherungen des Roboters an (Seilverankerungen etc.; 300 Euro/Gebäude).

Manuelle Alternative: In der manuellen Alternative wird die Arbeitsleistung durch speziell ausgebildete Industrie-Kletterer

⁹ Obwohl theoretisch ein 24 h-Schichtbetrieb möglich wäre, wird dies faktisch nicht angenommen, da eine Betreuung im Notfall möglich sein muss.



01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

erbracht. Die für die Sicherung der Kletterer notwendigen Investitionen (Seilverankerungen etc.) fallen entsprechend den Roboter-Szenarien pro Gebäude an und sind in ihrer Größenordnung vergleichbar (300 Euro/Gebäude).

Installationskosten: Für die Planung und (Erst-)Einrichtung des Systems wird ein externer Personalaufwand von 5 PT (40 Ph) pro Gebäude und Fassade (hier 23 Gebäude; 4 Fassaden pro Gebäude) benötigt – insgesamt also 3 680 Ph. Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen (100 Euro/Ph). Da für die Zweit-Einrichtung interne Techniker geschult werden müssen, fallen weiterhin noch Schulungsaufwände in Höhe von 5 PT (40 Ph) an. Auch diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen.

Manuelle Alternative: Für die Planung und (Erst-)Einrichtung der Seilsicherungen pro Gebäude wird ein interner Personalaufwand von 2 PT (16 Ph) pro Gebäude (23) benötigt (1 472 Ph) und mit 34,09 Euro verrechnet (die Tätigkeit übernehmen die Industrie-Kletterer; höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten), ansonsten keine Änderung.

Aktivitätskosten: Der Energieverbrauch beträgt 1,320 kW pro Roboter während der Produktivzeit (1 748,7 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt. Weitere Betreuungskosten: a) Reinigen/Bestücken der Geräte. b) Technische Betreuung (Prüfung der Befestigungen, Sensoren). Beide Tätigkeiten werden in den Nebenzeiten durch die Techniker durchgeführt (30 Minuten/Schicht + Anfahrt 30 Minuten/Schicht) sowie mit 34,09 Euro/h verrechnet (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten).

Manuelle Alternative: Die Personalkosten der Industrie-Kletterer werden mit 34 Euro/h angesetzt (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten).

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die technische Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt (100 Euro/h) – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. ver-

anschlagt. Zusätzlich fallen 3 PT für jede weitere Einrichtung an einer eingerichteten Fassade an – d.h. insgesamt 2 208 h (23 Gebäude, 4 Fassaden pro Gebäude). Diese Tätigkeit wird ebenfalls durch die geschulten Techniker erbracht.

SR-Variante B: Keine Änderung.

Manuelle Alternative: Die technische Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 1 PT (8 h) pro Jahr veranschlagt und wird durch die Industrie-Kletterer übernommen. Zweiteinrichtungen sind nicht notwendig.

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik (*s. Kap. 2.3.1.2*) 4 273 Tsd Euro jeweils für SR-Variante A und für SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

- Der berechnete Anwendungsfall bezieht sich auf ein Einsatz-Szenario an Fassaden mit einer (Reinigungs-)Fläche von ~ 1 800 m², wie sie beispielsweise an einem großen Hochhaus von 35 m Breite und 50 m Höhe zu finden ist.¹⁰
- **Kostenstruktur:** Bei dem hier betrachteten Szenario sind insbesondere die Wartungs- und Vorbereitungskosten mit ca. 51,8% Anteil an den Lebenszykluskosten der entscheidende Kostentreiber – hinzu kommen die Installationskosten, die mit 31,3% den zweitgrößten Anteil ausmachen. Skaleneffekte bzgl. der Anschaffungskosten des Serviceroboters spielen demnach hier keine Rolle.
- **Wirtschaftlichkeit:** Nach der vorliegenden LCC-Betrachtung sind die SR-Varianten deutlich teurer als die manuelle Leistungserbringung (Leistungskosten von 128,4 vs. 41,01 Euro pro Stunde). Auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF ergibt sich das gleiche Bild (-995,2 vs. -282,5 Tsd Euro).¹¹
- **Sensitivität:** Aufgrund der Kostenstruktur kommt als für

¹⁰ Schätzung: Die Reinigungsleistung des Roboters liegt bei 1 m²/min, was bei einem 16 Stunden Einsatz 960 m² entspricht. Bei einer Fensterdichte von 50% ergibt sich eine Fassadenfläche von 1 840 m².

¹¹ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).





01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

eine Sensitivitätsanalyse relevanter Parameter hier insbesondere die im Jahr zur Verfügung stehende Reinigungsleistung in Betracht. Dabei gilt: Je länger der Roboter ohne „Umsetzen“ am Stück arbeiten kann, desto wirtschaftlicher wird er im Vergleich zur manuellen Alternative. Daher muss die notwendige Reinigungsdauer pro Fassade eines Gebäudes steigen und sich gleichzeitig die Anzahl der Gebäude verringern:

- Selbst bei einer Verdopplung des Einsatzes an einer Fassade (2 Tage, also 18 Gebäude im Jahr bei Volllast) würden die Leistungskosten noch bei 62,41 Euro/h und damit immer noch deutlich über denen der manuellen Erbringung liegen (28,60 Euro/h).

3.2 Nutzwert

Der Kundennutzwert eines solchen Robotersystems lässt sich durch die folgenden Punkte zusammenfassen:

- Dokumentation der Reinigungsleistung
- Sicherheit für den Menschen, da die Arbeit durch Maschinen verrichtet wird
- Kurze Reaktionszeit durch Output-orientierte Service-Level
- Werbung als möglicher Zusatznutzen
- Arbeitsausführung unabhängig von den Helligkeitsverhältnissen, also beispielsweise auch bei Nacht. Dadurch entfallen auch eventuelle Überstunden- oder Nachtzuschläge.

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.





01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“

Statistisch wird der Bereich „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ (WZ 74.7) den „sonstigen Unternehmensnahen Dienstleistungen“ (WZ 74) zugeordnet.¹² Wesentliche Strukturdaten sind in Tab. 3-7.3 zusammengefasst.

2007 zählte der Bereich „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ fast 23 000 Unternehmen, von denen allerdings mehr als 80% weniger als 20 Mitarbeiter hatten. Insgesamt erwirtschafteten sie einen Umsatz von 13 188,9 Mio Euro und investierten 267,5 Mio Euro.

	Σ	1 – 19	20 – 49	50 – 249	ab 250
Unternehmen	22 988	18 683	1 795	1 900	610
Beschäftigte	808 365				
Umsatz (Mio €)	13 188,9	2 519,5	926,5	2 942,5	6 800,4
Investitionen* (Mio €)	267,5	97,3	29,5	58,0	82,7
Investitionen je Unternehmen** (T€)	1876	5,2	16,4	30,5	135,5
Aufwand*** (Mio €)	11 334,8				

* Für Deutschland existieren keine nach Größenklassen differenzierten Daten zu den Investitionen. Da diese jedoch im europäischen Vergleich existieren, können diese abgeschätzt werden - hier auf Basis des Durchschnitts von Frankreich, Italien und dem Vereinigten Königreich. Europäisches Statistik Amt (2010).

** Geschätzt. Siehe oben.

*** Statistisches Bundesamt (2010): Statistisches Jahrbuch 2010. (www.destatis.de)

Tab. 3-7.3 Strukturdaten „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ (WZ 74.7) 2007¹³, gegliedert nach der Anzahl der Mitarbeiter.

Lage:

Der Bundesinnungsverband des Gebäudereiniger-Handwerks beurteilt das weitere Wachstumspotenzial in vielen Bereichen des Reinigungsmarkts – insbesondere bei gewerblichen Großkunden – als nahezu ausgereizt und sieht daher keine großen Vergabepotenziale mehr an private Dienstleister.¹⁴ Eine Ausnahme stellen höchstens Gebäude in öffentlicher Hand – insbesondere Krankenhäuser – dar, bei denen insbesondere bei kommunalen Einrichtungen große Einsparpotenziale durch

¹² Statistisches Bundesamt (2009): Der Dienstleistungssektor. Wirtschaftsmotor in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse 2003 bis 2008. (www.destatis.de)

¹³ Soweit nicht anders erwähnt im Folgenden Europäisches Statistik Amt 2010. (<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home>). Datenmaterial für 2007

¹⁴ Im Folgenden soweit nicht anderes erwähnt Bundesinnungsverband des Gebäudereiniger-Handwerks (2010): Daten und Fakten. (http://www.gebaeudereiniger.de/daten_fakten.html)



FASSADENREINIGUNG

→ 4 MARKTDATEN

ein Outsourcing der Reinigungsaufgaben an spezialisierte Dienstleister gesehen werden.

Investitionsverhalten:

Die Kostenstruktur der Unternehmen gibt Tab. 3-7.4 wieder. Mit einer Personalaufwandsquote von 60,4% und einer Investitionsquote von 2,0% ist die Reinigungsbranche im Vergleich zu den anderen unternehmensnahen Dienstleistungen vergleichsweise personalintensiv und investitionsarm.

	In Mio €	In Prozent am Umsatz	Durchschnittswert WZ 74 in % am Umsatz
Umsatz*	13 235,8	100,0	100,0
Sachaufwand	3 345,5	25,2	44,0
Personalaufwand	7 989,3	60,4	26,6
Investitionen	267,4	2,0	12,3

* Die Daten des statistischen Bundesamtes weichen leicht von denen des europäischen Statistikamtes ab. Vgl. Tab. 3-7.3.

Tab. 3-7.4 Kostenstruktur „Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln“ (WZ 74.7) 2007¹⁵

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Fassadenreinigung“

Entfällt, da keine weiterführende Differenzierung der statistischen Daten möglich ist bzw. keine detaillierteren Studien verfügbar sind.

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

¹⁵ Statistisches Bundesamt (2010): Statistisches Jahrbuch 2010. (www.destatis.de)

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Anwendungsfall von Servicerobotern bezieht sich ausschließlich auf Unternehmen aus dem Bereich „Fassadenreinigung“. Auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes wird der relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 5):¹⁶

- Statistisch relevanter Sektor ist die "Reinigung von Gebäuden, Inventar und Verkehrsmitteln" (WZ 74.7).
- Bei dem hier betrachteten Serviceroboter-Szenario handelt es sich um einen Spezialfall der Gebäudereinigung (also die Reinigung von Groß-Fassaden),¹⁷ der so nicht statistisch erfasst wird und deshalb auf andere Weise eingegrenzt werden muss. Es wird daher im Folgenden angenommen, dass Gebäude mit einer ausreichend großen Fassadenfläche nur in Städten mit mehr als 100 000 Einwohnern verfügbar sind (2008: 81 Städte). Weiterhin wird angenommen, dass für deren Reinigung im Schnitt ein Reinigungsunternehmen ausreicht (~20 Gebäude pro Stadt).¹⁸ Somit ergeben sich 81 potentielle Anwenderunternehmen. Weiterhin wird angenommen, dass nur Reinigungsunternehmen ab einer bestimmten Größe in der Lage sind, die für die Serviceroboter-Investitionen notwendigen, finanziellen Mittel aufzubringen. Dies erscheint nur für Reinigungsunternehmen mit 250 und mehr Mitarbeitern plausibel.¹⁹ Die 81 Anwenderunternehmen werden dieser Gruppe zugeordnet.

¹⁶ Statistisches Bundesamt (2010): Statistisches Jahrbuch 2010. (www.destatis.de).

¹⁷ Ein wirtschaftlicher Betrieb der SR erfordert eine kritische Masse an Gebäuden mit sehr großen Fassadenflächen (vgl. Abschnitt 3.1.2).

¹⁸ Vgl. wieder Abschnitt 3.1.2

¹⁹ Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit durch die Reinigungsunternehmen. Bei der hier betrachteten SR-Investition sind Mittel in Höhe von mindestens 178 Tsd Euro notwendig. Entsprechend Tab. 3 kommen, wenn überhaupt, nur Reinigungsunternehmen mit 250 und mehr Mitarbeiter in Betracht.



01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 4 MARKTDATEN

Reinigungsunternehmen insgesamt	22 988
davon mit 250 und mehr Mitarbeitern	610
davon in Großstädten (Schätzung)	81

Tab. 3-7.5 Ableitung des relevanten Zielmarkts.²⁰

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 81 Reinigungsunternehmen als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-7.6):

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme betrug 2007 10 975,5 Tsd Euro.²¹
- Es wird geschätzt, dass etwa 50% dieser Summe in technische Ausrüstungen investiert wird (~5 487,8 Tsd Euro).²² Weiterhin wird geschätzt, dass davon wiederum 10% für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen könnten (~548,8 Tsd Euro).²³
- Jedes Serviceroboter-System besteht aus einem Serviceroboter. Bei einem Systempreis von 177,6 Tsd Euro (SR-Variante A) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~ 3 Servicerobotern (3 Serviceroboter-Systemen) führen – was letztlich zu einer Installed Base von 21 Servicerobotern (21 Serviceroboter-Systemen) im eingeschwungenen Markt-zustand führen würde (Lebensdauer 7 Jahre).

²⁰ Statistisches Bundesamt (2008)

²¹ Vgl. Tab. 3. Schätzung auf Basis der durchschnittlichen Investitionsaufwendungen in dieser Gruppe.

²² In Ermangelung geeigneter Daten. Da angenommen wird, dass der Anteil der Investitionen in Gebäude und Anlagen in der Reinigungsbranche im Vergleich zu anderen Branchen zugunsten von Investitionen in technische Ausrüstungen (also Reinigungsgeräte) eher gering ist, wird der Anteil von letzteren mit einem vergleichsweise hohen Wert angesetzt.

²³ In Ermangelung geeigneter Daten. Die hier betrachteten SR-Lösungen ersetzen zwar konventionelle Geräte und lösen daher sachlich keinen zusätzlichen Investitionsbedarf aus (keine zusätzlichen Geräte). Da sie aber einen wesentlich höheren Bedarf an Finanzmitteln haben als die Geräte, die sie ersetzen, konkurrieren sie faktisch aber dennoch um die knappen Finanzmittel mit anderen, notwendigen Investitionsprojekten. Daher wird ein niedriger SR-Anteil an den Investitionen angesetzt.

- Diese Werte sind allerdings nur als obere Grenzen für das Marktpotenzial zu sehen – ihr Erreichen setzt eine nach den Maßstäben der Branche positive Wirtschaftlichkeitsbetrachtung voraus. Aufgrund der negativen LCC-Betrachtung der hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsfelder (vgl. Kapitel 3.7.3.1) kann das hier errechnete Marktpotenzial nur langfristig und nur unter der Voraussetzung signifikanter Optimierungen hinsichtlich der Lebenszykluskosten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

Relevante Betriebe	~81
Brutto Investitionssumme (T€)	~10 975,5
davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~5 487,8
davon SR-Potenzial (T€)	~548,8
Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR Systempreis T€ 177,6; 1 SR pro System)	
errechnet	~3
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~0
Errechneter max. Bestand an SR (7 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
errechnet	~21
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~0

Tab. 3-7.6 Ableitung des Marktpotenzials (eigene Schätzungen).



FASSADENREINIGUNG

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht keine ernstzunehmende Alternative zur üblichen Leistungserbringung durch Industrie-Kletterer darstellen. Erst bei einer Fassadengröße in der Dimension großer Hochhäuser ("Mainhattan") könnte sie eine Alternative darstellen – allerdings würde in diesem Fall das Anwendungsszenario wahrscheinlich nicht mehr passen, da davon auszugehen ist, dass der Kunde zumindest tagsüber keine Seilkinematik vor seiner komplett verglasten Fassade akzeptieren würde.
- Als Grund für die fehlende Wirtschaftlichkeit sind die hohe Systemkomplexität und die damit verbundenen hohen Einrichtungskosten zu nennen. Es besteht hier also dringender Bedarf an „einfacheren“ Lösungen mit geringerem Vorbereitungsaufwand pro Einsatz.
- Vor diesem Hintergrund könnten sich aber dennoch Potenziale ergeben – soweit alternative Hersteller-Kundenbeziehungen bzw. Geschäftsmodelle dies zulassen: Würde der Besitzer eines genügend großen Hochhauses dieses System selbst betreiben, so könnte sich dies ggf. für ihn – verglichen mit der Beauftragung einer externen Reinigungsfirma – rechnen. Auch könnte der Hersteller Geschäftsmodelle anbieten, die die Finanzierungsschwierigkeiten für kleine Reinigungsfirmen mindern (beispielsweise Betreiber-Modelle) – vorausgesetzt, es böten sich für diese wirtschaftliche Einsatzszenarien (siehe oben). Aus dieser Perspektive heraus könnte dem Serviceroboter-System ein Potenzial als Nischenprodukt beigemessen werden.
- Es ist nicht anzunehmen, dass in einer so investitionsarmen Branche wie der Reinigungswirtschaft diese Nachteile durch die potenziellen Nutzwerte wie eine verbesserte Dokumentation oder Sicherheitsaspekte aufgewogen werden können.
- Vor diesem Hintergrund wird hier momentan nicht mit einer breiten Marktakzeptanz gerechnet und somit auch kein Marktpotenzial gesehen.

5.2 Forschungsbedarf

Neben der Integration von bestehenden Technologien und ggf. der Verbesserung von Teilkomponenten für diesen Anwendungsfall gibt es im Wesentlichen vier Teilbereiche, wo großer Forschungsbedarf besteht.

- Roboterarm:
 - Reduktion des Eigengewicht-Nutzlast-Verhältnisses: Dadurch kann die Effizienz durch die damit einhergehende Vergrößerung des Arbeitsraums gesteigert werden.
 - Fokussierung auf Leichtbau: Dadurch kann die bewegte Masse schneller bewegt und beschleunigt werden, was zu niedrigeren Durchlaufzeiten führt.
- Seilkinematik:
 - Exakte Berechnungen der optimalen Kinematik hinsichtlich des Arbeitsraums erhöhen die Präzision, die Zuverlässigkeit und die Größe des Arbeitsraums.
 - Erste Praxis-/Applikationstests in größerem Maßstab zeigen die Anwendbarkeit der Technologie.
- Reinigungstechnik:
 - Integration und Miniaturisierung von verschiedenen Reinigungstechniken in kleine, hoch integrierte Module
 - Nachweis der Anwendbarkeit von automatisierter Reinigung durch Roboter als „Türöffner“
 - Integration der Zu- und Abführtechnik von Reinigungsmedien über die Seilabhängung
- Software:
 - Integration von CAD/CAM-Ansätzen zur automatisierten und/oder assistierten Erstellung von Reinigungsprogrammen
 - Kartierung der zu reinigenden Fassade
 - Reaktive Kollisionsvermeidung während Lern- und Reinigungsfahrten
 - Kontextererkennung: zuverlässige Detektion von Überschneidungen und Konturen



01

02

03

04

05

06



07

08

09

10

11

FASSADENREINIGUNG

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B
Seilwinde und Motor	100 000 €	100 000 €
Reinigungsmodul	2 000 €	2 000 €
Versorgungsmodul	5 000 €	5 000 €
CCD-Kamera	500 €	500 €
Spindelantrieb	1 000 €	
Ultraschall-Sensoren	1 200 €	1 200 €
4 DOF-Roboterarm	20 000 €	20 000 €
Propellerantrieb		2 000 €

Tab. 3-7.7 Anschaffungskosten.

- Die enthaltenen Softwareentwicklungskosten sowie die sonstigen Entwicklungskosten sind als Gesamtsumme angegeben, die noch durch die zu erwartende Stückzahl zu teilen sind.
- Die Seile in der Kinematik wurden mit 2,50 Euro/m angenommen.



SZENARIOSTECKBRIEF

INNENAUSBAUASSISTENZ



08



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Beim Innenausbau von Gebäuden werden zur Unterteilung von großen Räumen in einzelne, kleinere Räume Trockenbauplatten in Kombination mit Profilschienen zur Erstellung von Zwischenwänden verwendet. Hierfür befestigen zwei Arbeiter zunächst Profilschienen an Böden, Wänden und Decken, indem sie durch die Profilschienen hindurch Bohrlöcher in den Untergrund setzen und in einem zweiten Schritt mit Schnellbauschrauben diese Schienen fest fixieren. Im folgenden Arbeitsgang werden Zwischenprofile in regelmäßigen Abständen mit den bestehenden Profilen verbunden.

Auf die fertiggestellte Grundstruktur werden im Anschluss daran Trockenbauplatten mit Hilfe von Elektroschraubwerkzeugen und Schnellbauschrauben befestigt. Für die Elemente, die als Zwischenwände dienen, werden in den Profilen vorgestanzte Bereiche im nächsten Schritt umgebogen und die elektrische Verkabelung hindurch geführt. Nach Fertigstellung der Verkabelung werden die Zwischenräume im Wandprofil mit wärme- und schalldämmendem Material ausgefüllt. Ist dies erfolgt, wird das jeweilige Wandsegment jetzt von der zweiten Seite mit Trockenbauplatten beplankt und somit die Wand verschlossen. Hierbei wird auf Dehnungsfugen zum Boden, zu den Wänden, zur Decke und zu den Platten untereinander hin geachtet. Ist der gesamte Raum so mit Zwischenwänden versehen, startet der nächste Abschnitt des Aufbaus. Die Fugen werden mit entsprechender Dichtmasse verspachtelt und so die noch bestehenden Spalten geschlossen. Im Anschluss an das Verfugen werden die entstandenen Unebenheiten abgeschliffen und so eine ebene Oberfläche geschaffen. Bei Bereichen, die besondere Anforderungen an Schall- und Brandschutz stellen, wird gegebenenfalls eine zweite Schicht aus Trockenbauplatten über der ersten angebracht. Auch diese Schicht wird im Anschluss daran verspachtelt und geschliffen.

Zum Abschluss werden noch die Elektrodosen an den dafür vorgesehenen Stellen in den Wänden platziert und mit den vorher eingebrachten Kabeln verbunden. Der Trockenbau ist

damit abgeschlossen und der Raum für etwaige Maler- oder Tapezierarbeiten bereit.



Abb. 3-8.1 Oben: Montage von Trockenbauplatten mit Hilfe des Trockenbauschraubers Hilti SD 5000 in Kombination mit Schraubenmagazin SMD 57. Unten: Manuelle Arbeit über die gesamte Raumhöhe



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Bei diesem Trockenbau-Prozess kommen zum Einsatz:

- Elektrowerkzeuge zum Verschrauben und Bohren
- Handwerkzeuge zum Verbinden von Profilen
- Spachtelwerkzeuge zum Verspachteln
- Schleifwerkzeuge zum Abschleifen

Ein typisches Ablaufdiagramm ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Sequenzdiagramm

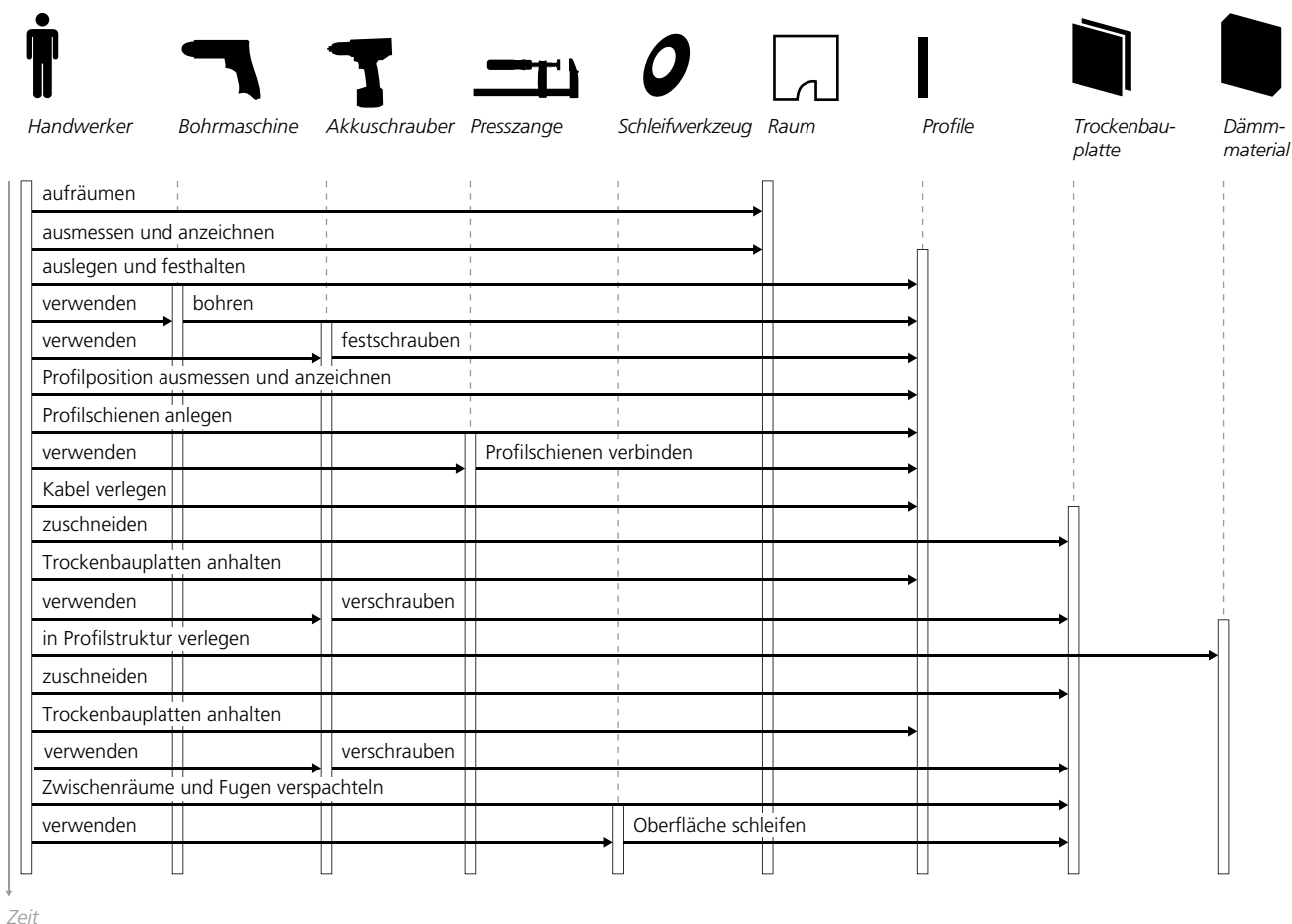


Abb. 3-8.2 Sequenzdiagramm eines Innenausbaus mit Trockenbauwänden



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.2 Probleme

Unsicherheiten gibt es bei der Präzision der ausgeführten Arbeiten. Dies führt zu in der Baubranche üblichen „bauseitigen“ Entscheidungen, d.h. Folgeaktionen sind in der Präzision und in ihrer Ausprägung von der Genauigkeit des Trockenbaus abhängig. Es können somit deutliche Verzögerungen und Abweichungen vom Bauplan entstehen. Weitere auftretende Probleme:

- Einsatz von schweren Elektrowerkzeugen in ungünstigen Körperhaltungen, z.B. beim Bohren über Kopf in die Decke, beim Bohren auf den Knien
- Langanhaltende Staubentwicklung beim Verschleifen der Fugen
- Teilweise kraftintensive Arbeit (z.B. Bohren/Schrauben über Kopf), Vibrationen und pulsartige Belastungen
- Vermessung (wenn überhaupt) nur zu Beginn, keine sensorische Überwachung der kontinuierlichen Arbeit.

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Ansätze zur Verbesserung durch Einsatz von Servicerobotern:

- Monotone und schwere Arbeiten können durch Serviceroboter unterstützt werden zur Ermüdminderung
- Größerer Durchsatz durch Roboterunterstützung und damit Erhöhung der Produktivität
- Erhöhte Präzision durch Prozess-integrierte Messtechnik
- Reduzierte Unsicherheit für Folgeaufgaben
- Keine Beschädigung der Trockenbauplatten, da niedrige und definiert regelbare Prozesskräfte, z.B. beim Verschleifen
- Hierbei wird die Staubbelastung für den Menschen durch vollständig integriertes automatisches Absaugen reduziert.
- Moderne Technik in einem handwerklichen Tätigkeitsumfeld.

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Die Anwenderbranche ist konservativ geprägt und arbeitet vorwiegend mit langfristig erprobten Arbeitsabläufen:

- Nach Expertenmeinung ist für die Einführung der Robotik im Baugewerbe ein Technologiesprung notwendig.
- Kapitaldecke für Investitionen ist bei Bauunternehmen in den meisten Fällen dünn.
- Baurobotik kann ein nachhaltiger wertschöpfender Faktor in Deutschland/Europa sein, da die Immobilien ebenso wenig wie die größten Teile der Gebäudeerstellung ins Ausland verlagert werden können.
- Krankenstand ist im Baugewerbe am höchsten (vgl. auch Kapitel 3.2).

1.4.2 Einsatzbereich

Der Einsatzbereich der im Fokus stehenden Bautätigkeiten ist der Innenausbau, d.h. Trockenbau, mittlerer bis großer Gebäude, in denen eine hohe Anzahl an Trockenbauplatten an den Wänden und Decken und als Zwischenwände im Raum verbaut werden sollen. Hierbei treten repetitive Vorgänge auf, die insbesondere bei größeren Baustellen und Bauobjekten personal- und kräftezehrend sind. Neben Bohr- und Verschraubungsarbeiten werden insbesondere auch Schleifarbeiten in großem Maß durchgeführt. Typischerweise werden hierfür Meisterbetriebe oder Baufirmen mit kleiner bis mittelständischer Größe engagiert.





01

02

03

04

05

06

07



08

09

10

11

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Das Szenario „Innenausbau“ ist arbeitsteilig aufgebaut. Ein Arbeiter kooperiert hierbei eng mit einem Serviceroboter. Beispielhaft sei der in Zyklen von Pos. 1 bis Pos. 12 stattfindende Ablauf für ein großes Gebäude und den dort notwendigen Innenausbau in Abb. 3-8.3 dargestellt.

- Repetitiver Aufbau eines Gebäudes, z.B. Hospital, Kongresszentrum, Unterkunft, etc.
- Der Arbeiter betritt mit dem Serviceroboter den nicht-ausgebauten Raum.
- In einer ersten Schleife werden an Boden, Wänden und Decke Profilschienen installiert.
- In einem zweiten Schritt werden diese mit weiteren Schienen verbunden zu einer Grundstruktur aus Profilschienen.

- Diese Grundstruktur wird einseitig in einem dritten Arbeitsgang mit Trockenbauwänden versehen.
- Die entstehenden halboffenen Wände werden im vierten Arbeitsschritt mit Füllmaterial versehen und elektrische Kabel verlegt.
- Die zweite Wandseite wird in der nächsten Stufe verschlossen mit Trockenbauplatten.
- Die nun verschlossenen Wände werden verspachtelt.
- Die getrocknete unebene Spachtelfläche wird verschliffen, sodass keine Übergänge mehr zu erkennen sind.

Arbeitsablauf SR-Variante A und B

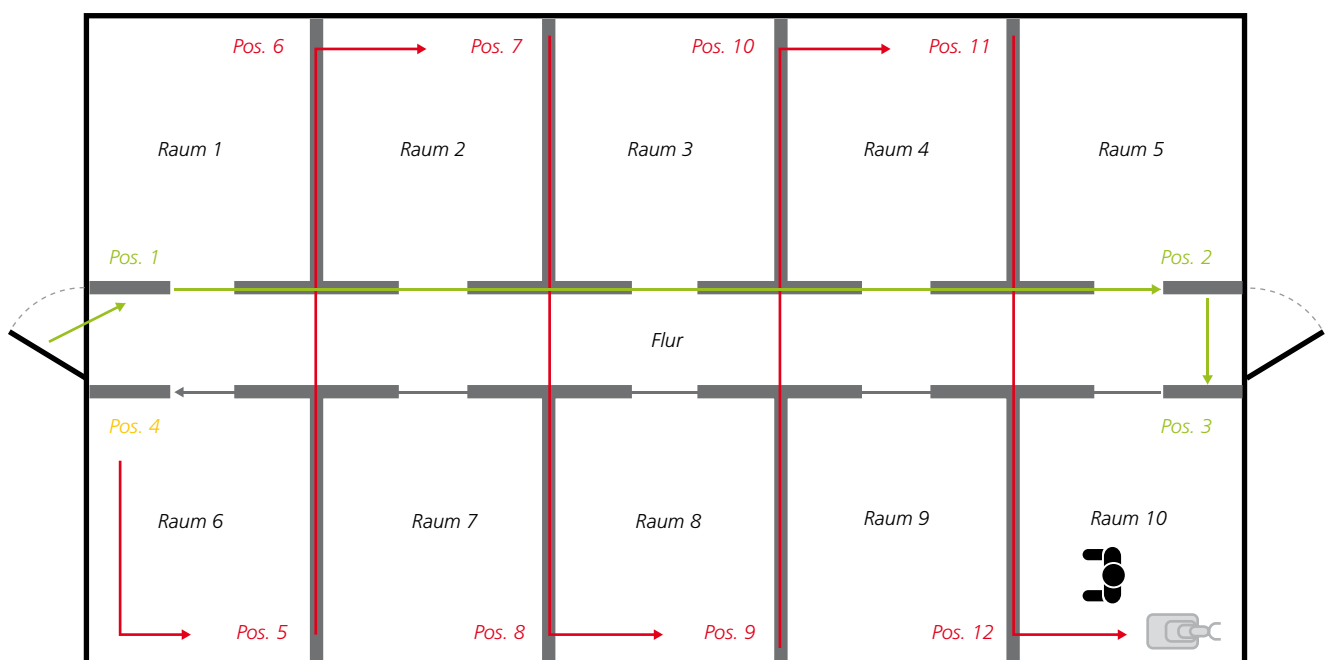


Abb. 3-8.3 Beispielhafter Arbeitsablauf bei SR-Variante A und B





INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Aufgaben und Ablauf

Der durch einen Serviceroboter unterstützte Ablauf der Montage von Trockenbauwänden wird im folgenden Sequenzdiagramm gezeigt.

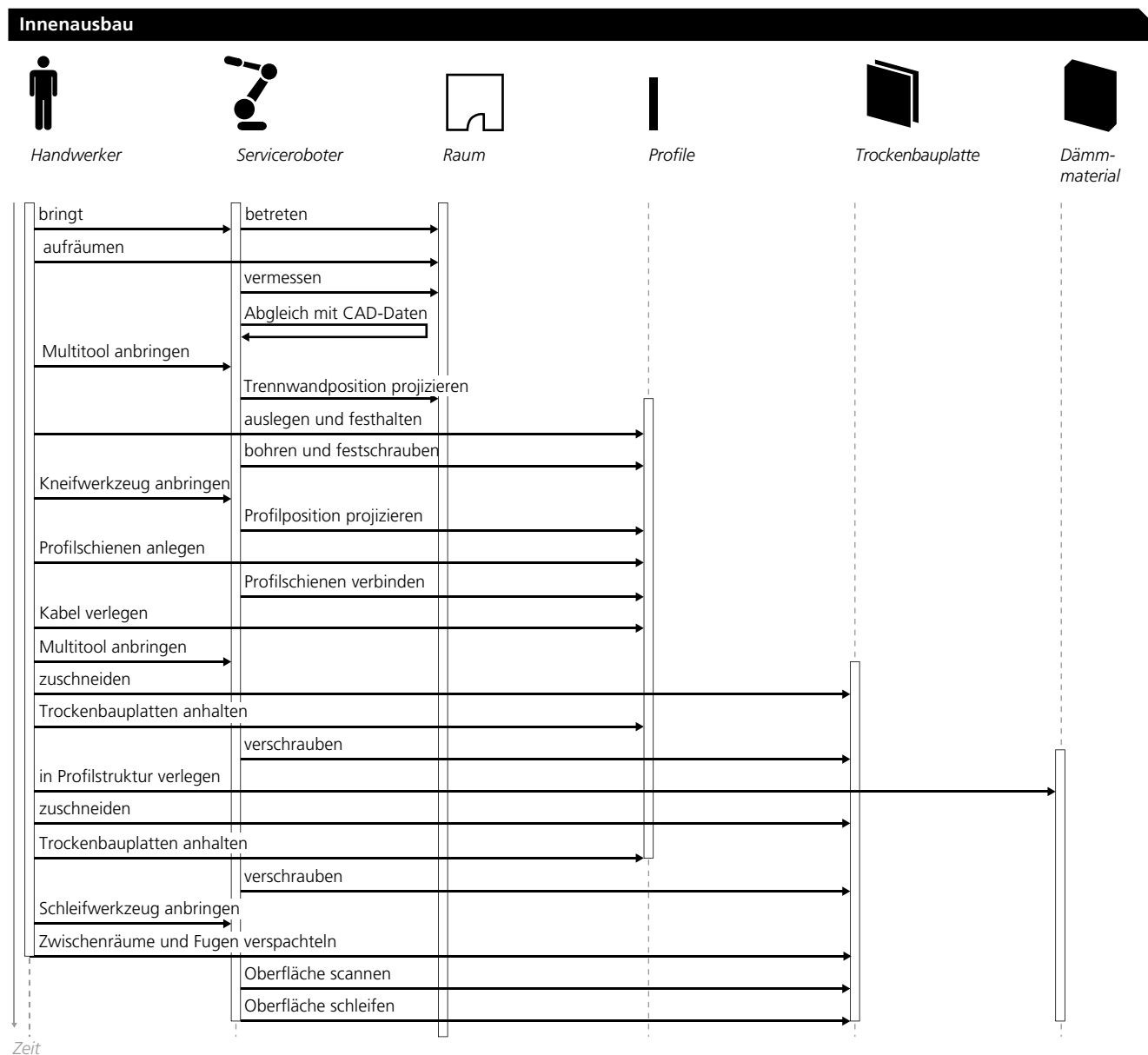


Abb. 3-8.4 Sequenzdiagramm: vom Serviceroboter unterstützte Montage von Trockenbauwänden. Aktivierungen und Rückmeldungen sind nicht enthalten.



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Anzumerken ist, dass die Zielpositionen der Profilstrukturen aus den CAD-Daten des Architekten (z.B. ArchiCAD 14) stammen. Sie können z.B. mittels eines USB-Sticks eingelesen werden.

Die Profilpositionen werden mittels eines am Roboterarm befestigten Kreuzlinienlasers projiziert, so dass ein Anzeichnen durch den Monteur entfallen kann. Nachdem der Monteur die Profilschienen ausgelegt und ausgerichtet hat, hält er die Schienen fest, um sie gegen Verrutschen zu sichern. Die Kommunikation mit dem Roboter erfolgt über eine Sprachschnittstelle, um größtmögliche Handlungsfreiheit zu erreichen. Das Anbringen von Steckdosen, Lichtschaltern und dergleichen ist in den Sequenzdiagrammen nicht berücksichtigt, da es ausschließlich ein manueller Prozess ist und auch kaum vom Roboter unterstützt werden kann.

2.2 Roboterentwurf

Der Serviceroboter wird für den unterstützenden und kooperierenden Einsatz im Bereich des Innenausbau konzipiert. Er soll in Zusammenarbeit mit einem menschlichen Arbeiter Montage und Bearbeitungsoperationen durchführen.

Typische durchzuführende Tätigkeiten sind z.B. das Vermessen des Raums, die Projektion von Trennwandpositionen auf den Boden oder die Wände, das Bohren von Befestigungslöchern und das Verschrauben der zur Wandbefestigung notwendigen Schrauben, das Scannen der Oberflächen nach dem Verspach-

teln durch den menschlichen Arbeiter und das anschließende maßgenaue Abschleifen.

Hierfür benötigt der Innenausbau-Roboter eine omnidirektionale Fahrplattform und die dazugehörige Sensorik (Navigation), eine vertikale Linearachse zur Erreichung aller Arbeitshöhen, eine daran angeschlossene hybride Knickarm-Kinematik für den grundlegenden Arbeitsraum und eine darauf aufbauende 3-DOF-Kinematik zur Erreichung aller Arbeitspositionen im Raum. Die Armbasis inkl. Steuerung ist hierbei schwerpunkt- und bauraumoptimal angebracht. Der Sonderkinematik-Arm ist leicht abnehmbar gestaltet, sodass zu Transportzwecken der Serviceroboter in zwei Komponenten mit weniger als 50 kg pro Hälfte zerlegt werden kann. Am Arm ist die Auslegung so gestaltet, dass ein Rotationslaser und ein einfacher Arm sich gegenseitig an der Kinematik massetechnisch kompensieren. Neben reduzierten Antriebsmomenten kann durch diese außermittige Gestaltung auch der Arbeitsraum ausgeweitet werden, sodass sowohl boden- als auch deckennahe Operationen durchgeführt werden können. Ein Linienlaser am letzten Armsegment dient den Werkzeugen als Sensor. Eine Schnellwechselschnittstelle dient dem schnellen Austausch der verschiedenen Werkzeuge.

Die Idee eines Innenausbauassistenten wurde bereits in Forschungsprojekten¹ aufgegriffen. Der hier gewählte Ansatz adressiert hingegen ein umfassenderes System mit autonomen Funktionen und Sicherheitstechnik.

¹ Ein Beispiel ist das hier zitierte Projekt des spanischen Bildungsministeriums. Gonzalez de Santos, P.; Estremera, J.; Garcia, E.; Armada, M.: Power assist devices for installing plaster panels in construction. In: *Automation in Construction*, Volume 17, Issue 4, May 2008, Pages 459-466, ISSN 0926-5805, DOI: 10.1016/j.autcon.2007.08.006. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V20-4PSJSY6-1I2/0fda002f6b935c8c97637a14a3d77fde>)



01

02

03

04

05

06

07



08

09

10

11

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

SR-Variante A



Abb. 3-8.5 Entwurf des Serviceroboters für den Innenausbau mit der SR-Variante A

Das Serviceroboter-System besteht aus:

1. Omnidirektionale Mecanum-Räder
2. Großer Lithium-Ionen-Akku für eine Operationszeit von mehr als 8 h in Plattform verbaut
3. Preiswerte Laserscanner/3-D-Kameras in mobiler Plattform
4. Flaches, breites Grundgehäuse mit weniger als 50 kg (1. Teil) ca. 75 x 100 cm
5. Armbasis inkl. Armsteuerung, demontierbar inkl. komplettem Arm mit weniger als 35 kg (2. Teil)
6. 1-DOF vertikale Linearachse für Reichweite bis Boden/Decke
7. Hybride Knickarm-Kinematik mit 3-DOF
8. Rotationslaser zur Raumvermessung
9. Zusätzlich ein 2-DOF und ein 1-DOF Modul mit 150 N aufbringbarer Kraft am Endeffektor
10. Linienlaser zum Messen und Kreuzlinienlaser zum Projizieren
11. Wechselsystem mit Bohr-/Schraubwerkzeug = Multitool, Schleifwerkzeug und Kneifwerkzeug für Bleche



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

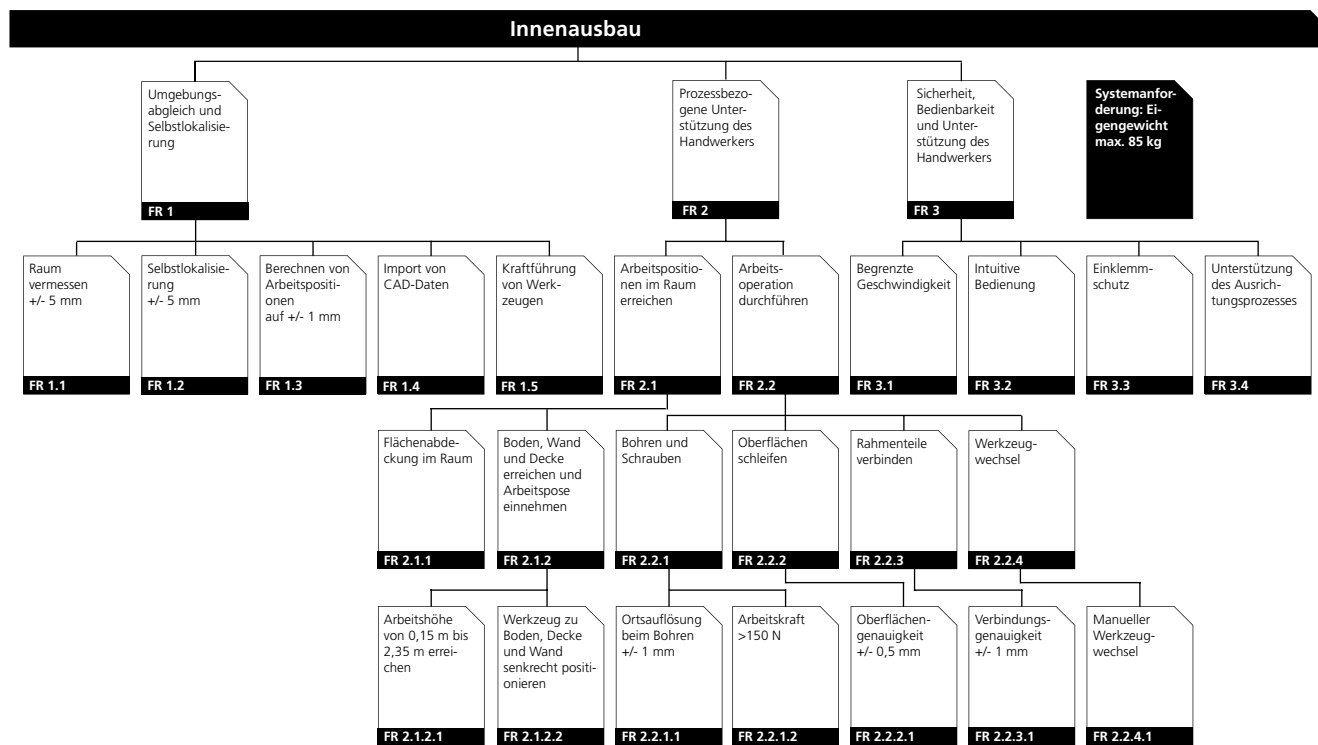


Abb. 3-8.6 Axiomatic Design – Functional Requirements der SR-Variante A

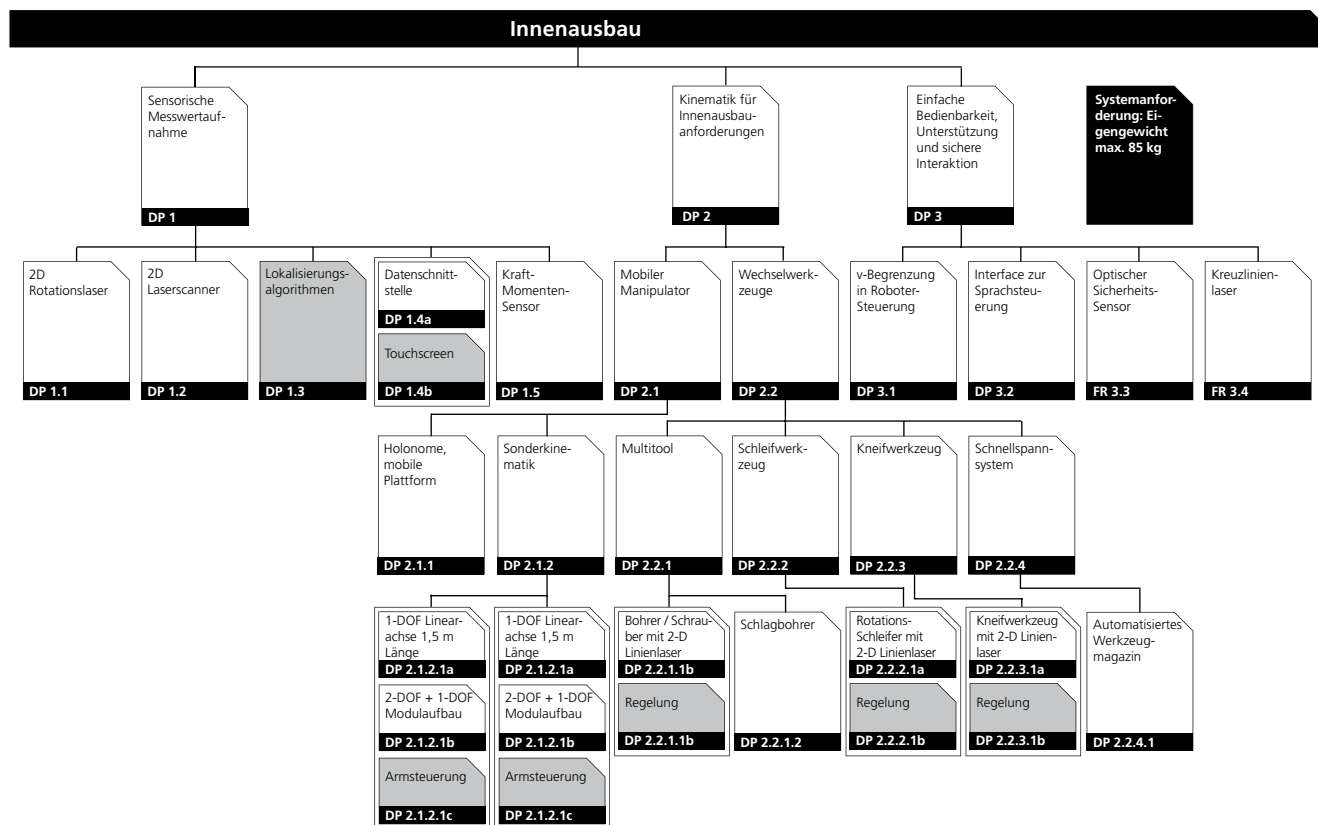


Abb. 3-8.7 Axiomatic Design – Design Parameters der SR-Variante A



01

02

03

04

05

06

07



08

09

10

11

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

TRL / € / FR-Diagramm

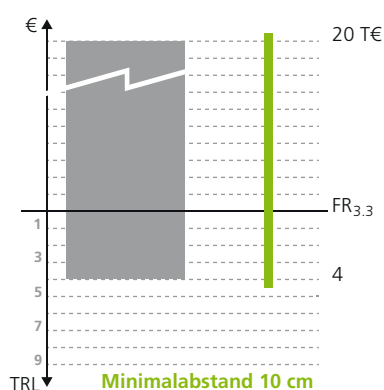


Abb. 3-8.8 TRL/€/FR-Diagramm für den Einklemmschutz.

Es wird ein Minimalabstand von 10 cm zum Menschen gefordert, so dass keine Kollision auftreten kann. Derzeit ist bei kooperierenden Serviceroboter-Lösungen der Minimalabstand wesentlich größer und nicht dreidimensional über die gesamte Oberfläche verfügbar.

2.2.2 Software

Folgende Softwarefunktionen werden benötigt:

- Verlässliche Spracherkennung zum sicheren Erkennen von Sprachbefehlen im Einsatzumfeld:
 - Einfache Bedienführung
 - Vermeidung von unbefugtem Bedienen
 - Sprachbefehle für die Übergabe von Teilen im Baugewerbe
- Sprachmodule verfügbar, Anpassungsaufwand niedrig bzgl. Hintergrundgeräusche und -gespräche, Fehlbedienungen ausschließen
- Selbst-Lokalisierung und Vermessung von Räumen
 - Selbst-Ortungsgenauigkeit ca. ± 5 mm
 - Vermessung von Räumen (Untermenge der Szenenanalyse) ist Grundvoraussetzung zur Selbst-Lokalisierung
- Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig

- Armsteuerung
 - Trajektorienplanung und Bewegungsführung zum Greifen und Halten von Montageteilen
 - Kollisionsfreie Bewegungsplanung
- Anlehnung an die neu entstehenden, die Sicherheit von Roboteranwendungen betreffenden Normen
- Ablaufsteuerung
 - Laden der CAD-Montagedaten via USB für spezifischen Raum
 - Steuerung des gesamten Ablaufs
- Grundkomponenten verfügbar, ablauf- und komponentenspezifische Anpassungen nötig

2.2.3 Varianten

Die SR-Variante B unterscheidet sich von der Basisversion dahingehend, dass ein automatisches Werkzeugwechselsystem den manuellen Werkzeugwechsel ersetzt. Das zugehörige Sequenzdiagramm ist in der folgenden Darstellung abgebildet.





INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Innenausbau



Handwerker



Serviceroboter



Werkzeugwechsler



Raum



Profile



Trockenbauplatte



Dämmmaterial

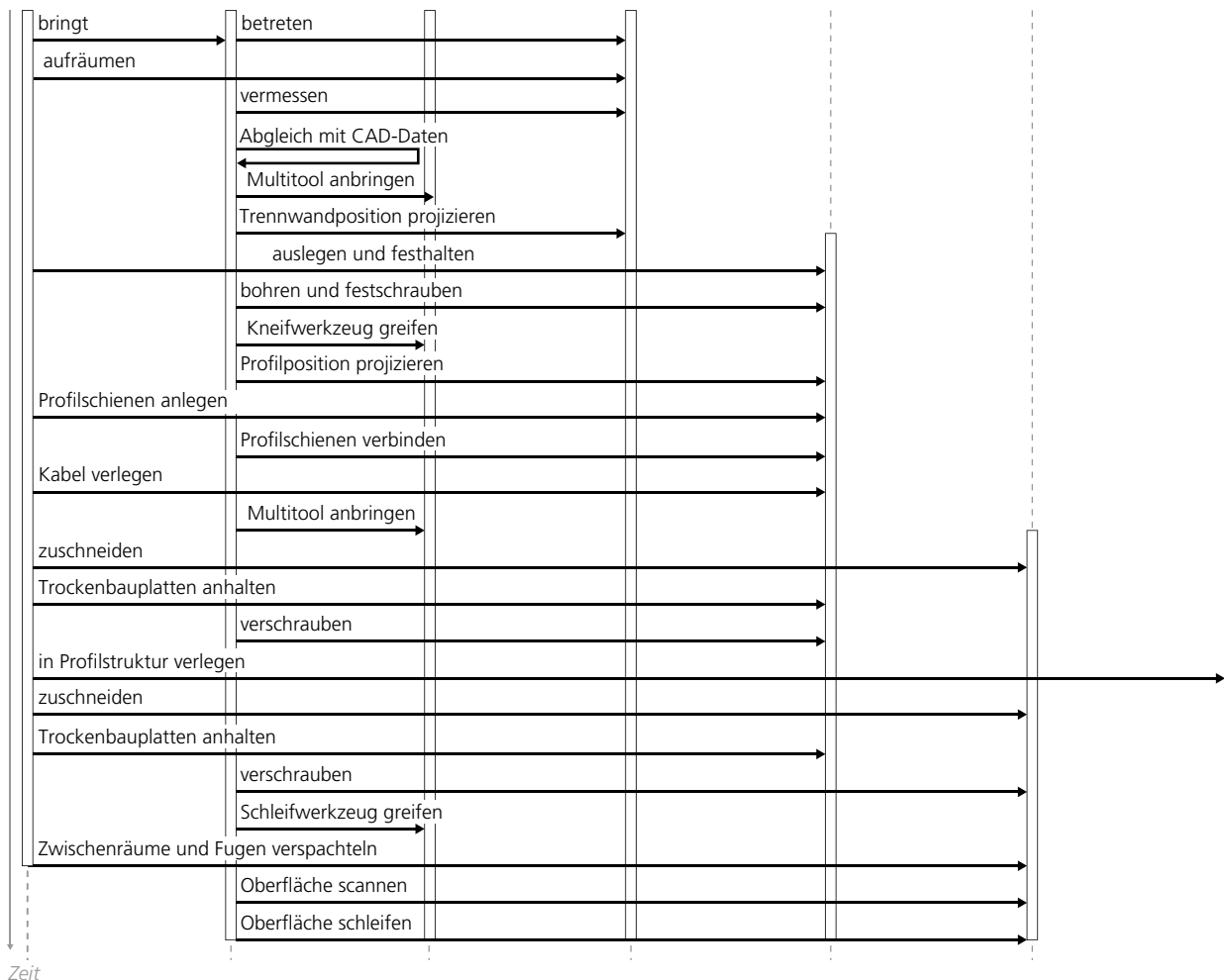


Abb. 3-8.9 Sequenzdiagramm der SR-Variante B



01

02

03

04

05

06

07



08

09

10

11

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE



SR-Variante B

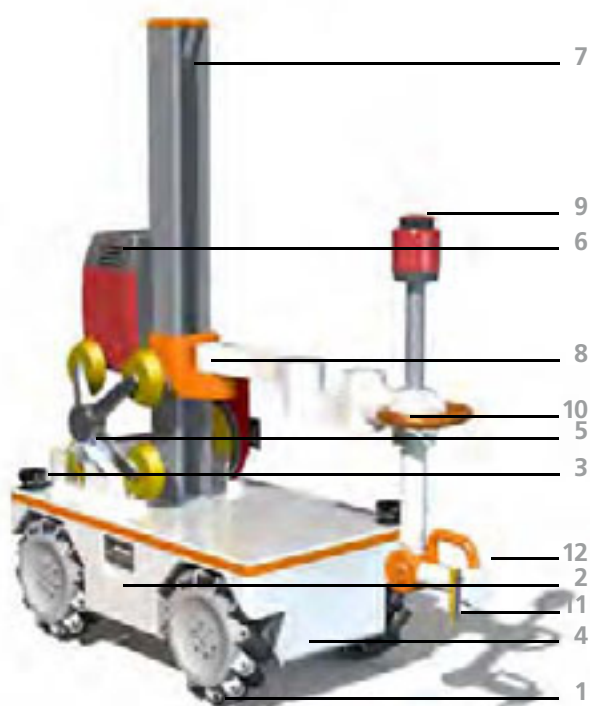


Abb. 3-8.10 Entwurf des Serviceroboters für den Innenausbau der SR-Variante B

Das Servicerobotersystem (SR-Variante B) besteht aus:

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Omnidirektionale Mecanum-Räder 2. Großer Lithium-Polymer-Akku für eine Operationszeit von mehr als 8 h in Plattform verbaut 3. Preiswerte Laserscanner/3-D-Kameras in mobiler Plattform 4. Flaches, breites Grundgehäuse mit weniger als 50 kg (1. Teil) ca. 75 x 100 cm 5. Automatisiertes Werkzeugmagazin 6. Armbasis inkl. Armsteuerung, demontierbar inkl. komplettem Arm mit weniger als 35 kg (2. Teil) | <ol style="list-style-type: none"> 7. 1-DOF vertikale Linearachse für Reichweite bis Boden/Decke 8. Hybride Knickarm-Kinematik mit 3-DOF 9. Rotationslaser zur Raumvermessung 10. Zusätzlich ein 2-DOF und ein 1-DOF Modul mit 150 N aufbringbarer Kraft am Endeffektor 11. Linienlaser zum Messen und Kreuzlinienlaser zum Projizieren 12. Wechselsystem mit Bohr-/Schraubwerkzeug = Multitool, Schleifwerkzeug und Kneifwerkzeug für Bleche |
|---|---|



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

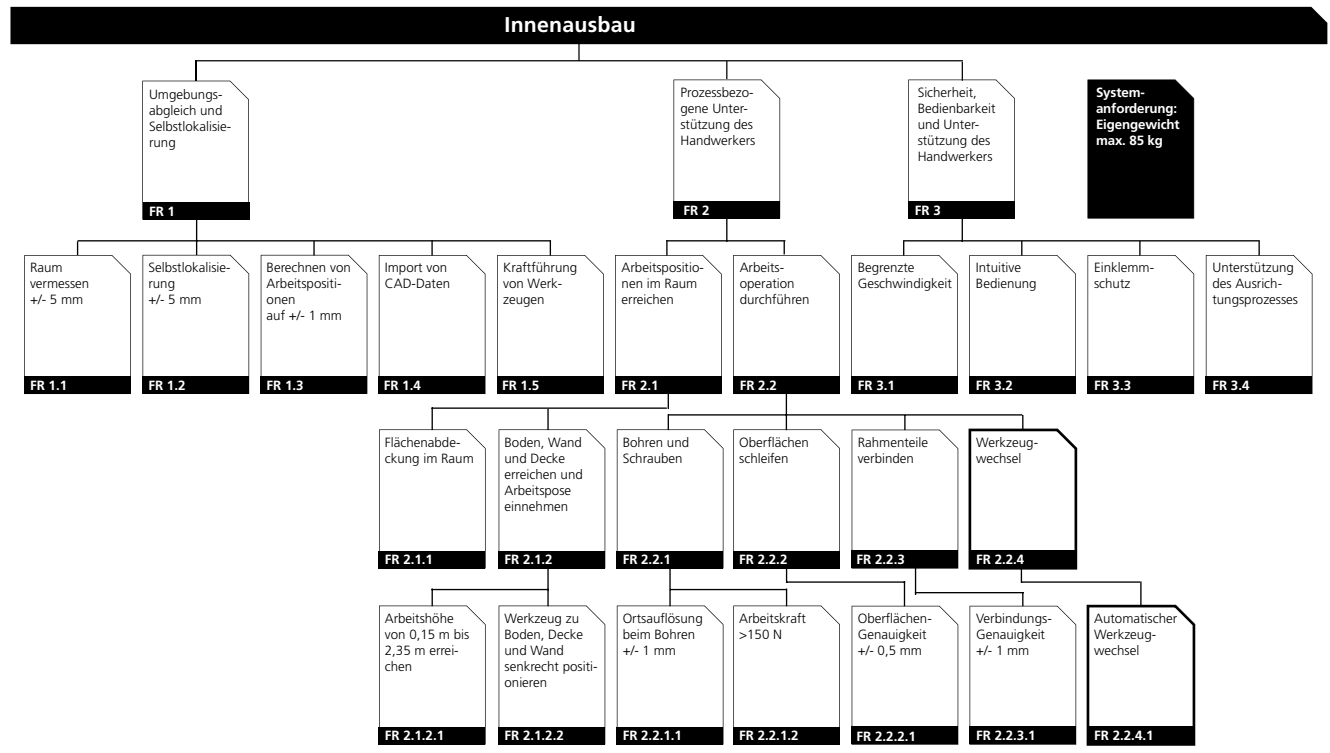


Abb. 3-8.11 Axiomatic Design – Functional Requirements der SR-Variante B

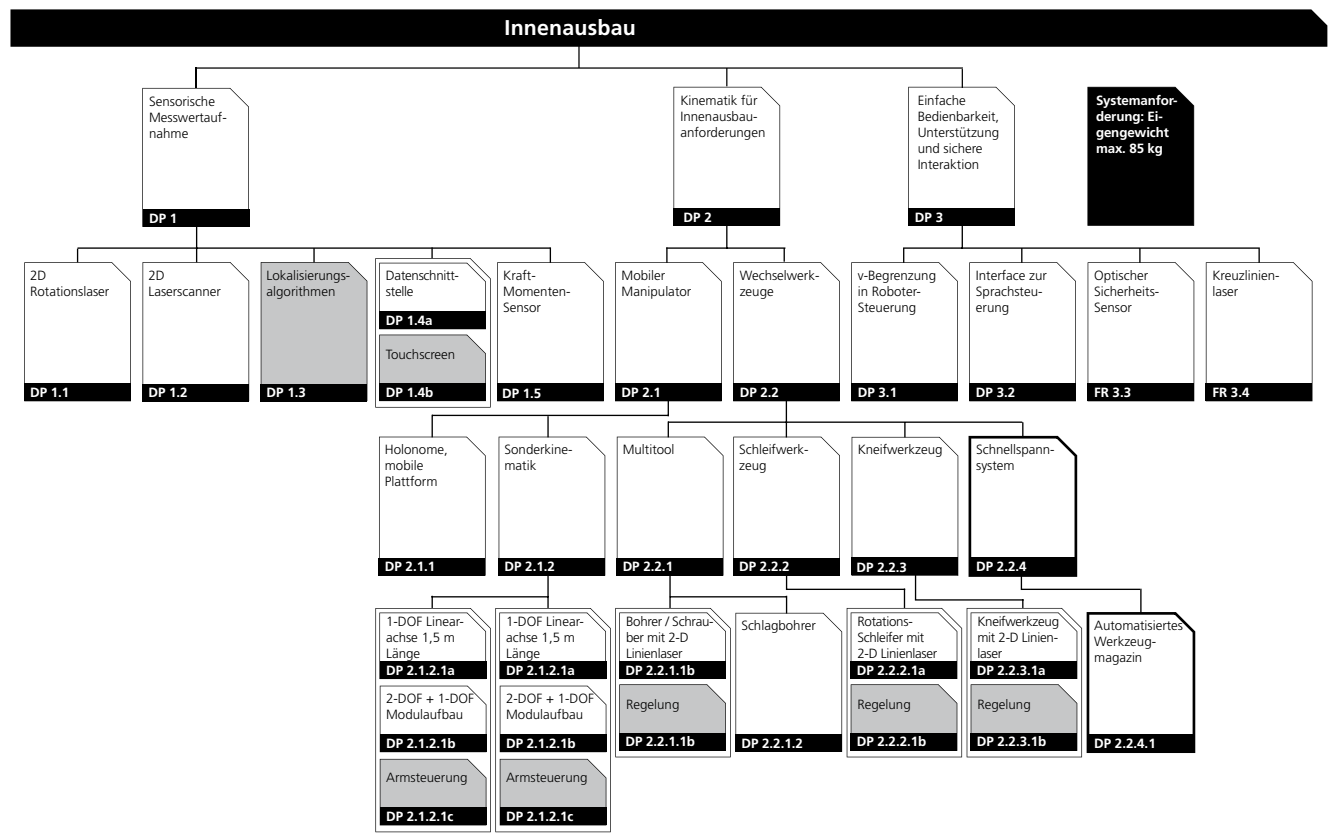


Abb. 3-8.12 Axiomatic Design – Design Parameters der SR-Variante B

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse	
FR 1 Umgebungsabgleich und Selbstlokalisierung	FR 1.1 Raum vermessen +/- 5 mm	DP 1.1 2D-Rotationslaser	1 000 €	9	2	keine	
	FR 1.2 Selbstlokalisierung +/- 5 mm	DP 1.2 2D-Laserscanner	3 000 €	9	2	keine	
	FR 1.3 Berechnen von Arbeitspositionen auf +/- 1 mm	DP 1.3 Lokalisierungsalgorithmen		7	2	Unsicherheiten in Sensordaten	
	FR 1.4 Import von CAD-Daten		DP 1.4a Daten-Schnittstelle	in PC	9	2	keine
			DP 1.4b Dateninterpretation		7	2	Limitierung auf bestimmte Datenformate vs. Allgemeingültigkeit
FR 1.5 Kraftführung von Werkzeugen		DP 1.5 4-DOF Kraft-Momenten-Sensor	7 500 €	9	2	keine	
FR 2.1 Arbeitspositionen im Raum erreichen	FR 2.1.1 Flächenabdeckung im Raum	DP 2.1.1 Holonome mobile Plattform	50 000 €	9	2	keine	
	FR 2.1.2.1 Arbeitshöhe von 0,15 bis 2,35 m	DP 2.1.2.1a 1-DOF Linearachse 1,5 m Länge	10 000 €	9	2	schmutz- und staubsicher	
	FR 2.1.2.2 Werkzeug zu Boden, Decke und Wand senkrecht positionieren	DP 2.1.2.2a 3-DOF-Scara-Arm	25 000 €	9	2	keine	
		DP 2.1.2.1b/2.1.2.2b 2-DOF + 1 DOF Module	10 000 €	9	2	keine	
		DP 2.1.2.1c/2.1.2.2c Armsteuerung		7	2	Redundanzauflösung und Kollisionsvermeidung	
FR 2.2.1 Bohren und Schrauben	FR 2.2.1.1 Ortsauflösung beim Bohren +/- 1 mm	DP 2.2.1.1a Bohrer / Schrauber mit 2D-Linienlaser	4 000 €	7	2	Dateninterpretation von Punktwolke	
		DP 2.2.1.1b Regelung		7	2	Positionierung und Ausregelung	
	FR 2.2.1.2 Arbeitskraft > 150 N	DP 2.2.1.2. Schlagbohrer	oben enthalten	9	2	keine	
FR 2.2.2 Oberflächen schleifen	FR 2.2.2.1 Oberflächen-genauigkeit +/- 0,5 mm	DP 2.2.2.1a Rotations-schleifer mit 2-D Linien-laser	2 000 €	7	2	Dateninterpretation von Punktwolke	
		DP 2.2.2.1b Regelung		7	2	Positionierung und Ausregelung	
FR 2.2.3 Rahmentteile verbinden	FR 2.2.3.1 Verbindungs-genauigkeit +/- 1 mm	DP 2.2.3.1a Kneifwerkzeug mit 2-D Linienlaser	2 000 €	7	2	Dateninterpretation von Punktwolke	

>>

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
		DP 2.2.3.1b Regelung		7	2	Positionierung und Ausregelung
FR 2.2.4 Werkzeugwechsel	FR 2.2.4.1 Manueller Wechsel	DP 2.2.4.1 Bajonett-Verschluss	1 500 €	9	1	keine
FR 3 Sicherheit, Bedienbarkeit und Unterstützung des Handwerkers	FR 3.1 Begrenzte Geschwindigkeit	DP 3.1 v-Begrenzung in Robotersteuerung		9	2	keine
	FR 3.2 Intuitive Bedienung	DP 3.2 Interface zur Sprachsteuerung	in PC	9	2	keine
	FR 3.3 Einklemmschutz	DP 3.3 Optischer Sicherheitssensor	20 000 €	4	2	Vollständige Abdeckung des kritischen Bereichs und Zulassung durch BG
	FR 3.4 Unterstützung des Ausrichtungsprozesses	DP 3.4 Kreuzlinienlaser	500 €	9	2	keine

SR-Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 2.2 Arbeitsoperation durchführen	FR 2.2.4 Werkzeugwechsel	DP 2.2.4 Schnellspannsystem	4 500 €	9	1	keine
FR 2.2.4 Werkzeugwechsel	FR 2.2.4.1 Automatischer Werkzeugwechsel	DP 2.2.4.1 Automatisiertes Werkzeugmagazin	10 000 €	9	1	keine

Tab. 3-8.1 Komponentenübersicht



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Manuelle Alternative	
Grunddaten Use Case	8		8		8	
• Lebensdauer (a)	1		1		-	
• Anzahl Roboter (System)	1		1		0	
• Eff. Produktivzeit (h/a)	0		0		0	
• Personalstunden (h/a)	2 600		2 600		2 340	
• Serviceleistung (h/a)	2 340		2 340		2 340	
LCC-Summe (T€)	927,8	100,0%	950,7	100,0%	1 116,8	100,0%
• Investition	190,4	20,5%	207,3	21,8%	-	-
• Installationskosten	4,0	0,4%	4,0	0,4%	-	-
• Aktivitätskosten	638,7	68,8%	638,7	67,2%	1 116,8	100,0%
• Wartung/Instand.	94,7	10,2%	100,6	10,6%	-	-
• Andere	-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)	-704,5		-725,5		-776,7	
Softwarekosten (T€)	4 299,8		4 299,8		-	
Leistungskosten (€/h)	56,64		58,04		68,2	

Tab. 3-8.2 LCC

Erläuterungen zu Tabelle 3-8.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tabelle 3-8.2 ausgehend von der SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Robotersystems ausgegangen (52 Wochen à 5 Tage; 260 Tage). Das Robotersystem wird von einem Handwerksbetrieb auf verschiedenen Baustellen eingesetzt und der Einsatzdauer entsprechend den Kunden in Rechnung gestellt. Das System wird in einem Einschicht-Modell bei 10 h Schichtdauer eingesetzt. Der Serviceroboter unterstützt dabei einen Handwerker bei den Montagearbeiten. Die theoretische Produktivzeit beträgt bei diesem Schichtmodell von 2 600 h/a (Volllast) – da jedoch die technische Verfügbarkeit des Systems mit 90% angesetzt wird, ergibt sich eine effektive Produktivzeit 2 340 h/a. Die effektive Produktivzeit des Systems entspricht der Serviceleistung, die dem Kunden in Rechnung gestellt werden kann; das Personal muss jedoch für

die nominelle Produktivzeit entlohnt werden.

SR-Variante B: Keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Zum Vergleich mit den Serviceroboter-Varianten wird davon ausgegangen, dass zwei Handwerker für die Tätigkeiten benötigt werden. Für diese werden hier jedoch nur die Kosten für eine mit den Serviceroboter-Varianten vergleichbare Arbeitsleistung angesetzt (~2 340 h/a) und mit einem entsprechenden Kostensatz verrechnet. Für diese werden Personalkosten in Höhe von 34 Euro/h verrechnet (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten).

Investition: Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (146,5 Tsd Euro pro Roboter) – hinzu kommt ein 30%iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

SR-Variante B: Aufgrund der technischen geänderten Konfiguration ist die Summe der Komponentenkosten höher als in der SR-Variante A (159,5 Tsd Euro) – hinzu kommt ein 30%iger



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators. Ansonsten keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Keine anderen/zusätzlichen Aufwände.

Installationskosten: Da die Handwerker im Umgang mit dem Serviceroboter geschult werden müssen, fallen Schulungsaufwände in Höhe von 5 PT (40 Ph) an. Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen.

SR-Variante B: Keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Keine Aufwände.

Aktivitätskosten: Der Energieverbrauch beträgt 1,207 kW pro Roboter während der Produktivzeit (2 824 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt.

Weitere Betreuungskosten: Die Anlage erfordert in jeder Schicht eine technische Betreuung (Sichtprüfung der Roboter etc. ca. 15 Minuten/Schicht). Dafür werden Personalkosten in Höhe von 34 Euro/h verrechnet (diese Aufgabe wird von dem Handwerker am Anfang einer Schicht durchgeführt).

SR-Variante B: Der Energieverbrauch beträgt 1,208 kW pro Roboter während der Produktivzeit (2 827 kWh/a). Ansonsten keine Änderung.

Manuelle Alternative: Die Personalkosten der Handwerker werden mit 34 Euro/h angesetzt (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten).

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von 100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

SR-Variante B: Keine Änderungen

Manuelle Alternative: Keine Aufwände

Softwarekosten: Geschätzt nach vorgestellter Methodik (s. Kap. 2.3.1.2 Abschätzung von Softwareentwicklungskosten) 4 300 Tsd Euro sowohl für SR-Variante A als auch Variante B.

3.1.2 Einschätzung

Bei diesem Serviceroboter-Anwendungsfall handelt es sich um eine Automatisierungslösung, bei der genau eine menschliche Arbeitskraft im Vergleich zur manuellen Alternative während der Produktivzeit des Systems vollständig substituiert wird. Es wird davon ausgegangen, dass das System vollausgelastet ist.

Kostenstruktur: Auch im Serviceroboter-Szenario dominieren die Aktivitätskosten mit etwa 70% den Großteil der Lebenszykluskosten, was fast ausschließlich auf die Lohnkosten der verbliebenen Arbeitskraft zurückzuführen ist.

Wirtschaftlichkeit: Die Serviceroboter-Varianten sind gegenüber der konventionellen Durchführung deutlich günstiger – sowohl im Rahmen der (relevanten) Prozesskosten von 56,6 Euro/h bzw. 58,0 Euro/h vs. 68,2 Euro/h als auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF (-704,5 bzw. -725,5 vs. -776,7 Tsd Euro).² Bzgl. der laufenden Kosten führt die Serviceroboter-Variante im Vergleich zur manuellen Alternative zu einer Ersparnis von 383,4 Tsd Euro bzw. 377,5 Tsd Euro, so dass bei 7 Jahren Lebensdauer eine Amortisation der Investition rechnerisch nach etwa 3,5 Jahren möglich ist.³

Sensitivität: Auf Grund der Kostenstruktur kommt als für eine Sensitivitätsanalyse relevanter Parameter insbesondere die „Verfügbarkeit“ des Systems in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Szenarien ähnlich und proportional oder sind im Vergleich zur Gewichtung bzgl. der Aktivitätskosten irrelevant):

Selbst bei einer reduzierten Verfügbarkeit der Serviceroboter-Systeme (80%) erhöhen sich die Prozesskosten nur auf 63,7 Euro/h bzw. 65,3 Euro/h und sind damit immer noch deutlich günstiger als die manuelle Alternative.

² Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

³ Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante A = $1\ 116,8 - (638,7 + 94,7) = 383,4$ >> $(190,4 + 4,0)$. Amortisationsdauer = $(190,4 + 4) / 383,4 * 7$.



01

02

03

04

05

06

07



08

09

10

11

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3.2 Nutzwert

Im Baugewerbe fallen gemäß der Studie des Wissenschaftlichen Instituts der AOK⁴ die höchsten Krankenstände der betrachteten Berufsgruppen an. 27% davon entfallen auf Muskel- und Skeletterkrankungen, weitere 20% auf Verletzungen allgemein. Durch das Entlasten von einigen Tätigkeiten durch Roboter können ggf. auch das Verletzungsrisiko und damit der Krankenstand gesenkt werden.

Weiterhin entlastet der Roboter den Menschen von monotonen Arbeiten und erhöht die Arbeitsqualität, da auch Arbeiten über Kopf durch den Roboter reduziert werden können.

⁴ Fehlzeiten-Report 2009. Badura, B.; Schröder, H.; Klose, J.; Macco, K. (Hrsg.) (2010): Arbeit und Psyche: Belastungen reduzieren - Wohlbefinden fördern. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-01077-4. Zusammenfassungen auf <http://www.aok-business.de/baden-wuerttemberg/gesunde-unternehmen/gesundheitsmanagement.php> und Spiegel online, URL: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/0,1518,705576,00.html>, abgerufen am 14.12.2010.

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Baugewerbe“

Statistisch wird das Baugewerbe (WZ F) in die Bereiche „Bauhauptgewerbe“ (WZ 41.2, 42, 43.1, 43.9), „Ausbaugewerbe“ (WZ 43.2, 43.3) sowie „Erschließung von Grundstücken; Bauträger“ abgegrenzt⁵. Wesentliche Strukturdaten fassen Tab. 3-8.3 und Tab. 3-8.4 zusammen.

2008 zählte das Baugewerbe mehr als 12 000 Unternehmen, die mit ca. 666 000 Beschäftigten einen Umsatz von mehr als 90 Mrd Euro erwirtschafteten. Der Bruttoproduktionswert betrug 96 Mrd Euro in 2008.

Betrachtet man die Verteilung der Unternehmen nach Größenstrukturen in diesem Markt (vgl. Tab. 3-8.4), so wird deutlich, dass sämtliche Teilssegmente des Baugewerbes durch kleine Unternehmen mit weniger als 50 Mitarbeitern geprägt sind.

5 Statistisches Bundesamt (2010): *Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe 2008 (Fachserie 4 Reihe 5.3)* (www.destatis.de): „Zum Bauhauptgewerbe zählen der Bau von Gebäuden, der Tiefbau, Abbrucharbeiten, Vorbereitende Baustellenarbeiten und Bautätigkeiten wie Dachdeckerei, Zimmerei, Bauspenglerei, Gerüstbau. Im Ausbaugewerbe sind die Bauinstallation, das Stuckateurgewerbe, Gipserei und Verputzerei, die Bautischlerei und -schlosserei, die Fußbodenlegerei und Tapeziererei sowie das Maler- und Glasergewerbe zusammengefasst.“

	Insgesamt	Bauhauptgewerbe	Ausbaugewerbe	Erschließung von Grundst.; Bauträger
Unternehmen	12 700	6 217	6 422	61
Betriebe*	81 356	74 535	6 821	_**
Beschäftigte	666 561	296 024	367 599	2 938
Umsatz (T€)	90 678 194	57 696 80931	765 876	1 215 509

* Ein Unternehmen kann hier mehrere Betriebe umfassen (Baustellen sind keine Betriebe).
** Für 2008 nicht ausgewiesen

Tab. 3-8.3 Strukturdaten „Baugewerbe 2008“⁶

Mitarbeiter	Bauhauptgewerbe	Ausbaugewerbe	Erschließung von Grundst.; Bauträger
20 – 49	4 304	5 196	44
50 – 99	1243	910	12
100 – 249	524	256	5*
250 – 499	105	42	
500 – 999	32	12	
1000 und mehr	9	6	

* hier: 100 und mehr.

Tab. 3-8.4 Größenstrukturen im Baugewerbe 2008⁷

Lage in der Bauwirtschaft:

Insgesamt wird die Lage in der deutschen Bauwirtschaft nach den kontinuierlichen Verschlechterungen der Rahmenbedingungen in den 1990er Jahren wieder positiver beurteilt. Während sich die Beschäftigung in der Dekade von 1995 und 2004 um fast 59% auf 411 000 mehr als halbierte und der Bruttoproduktionswert von 133 563 Mio Euro auf 78 751 Mio Euro zurückging, so spiegeln die Zahlen von 2008 eine deutliche Erholung der Lage in der Bauwirtschaft wider.⁸

6 Statistisches Bundesamt (2010): *Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe 2008 (Fachserie 4 Reihe 5.3)*. (www.destatis.de); Erfasst werden nur Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern. (Baustellen sind keine Betriebe).

7 Statistisches Bundesamt (2010): *Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe 2008 (Fachserie 4 Reihe 5.3)*. (www.destatis.de)

8 Siehe oben.



INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

Investitionsverhalten:

Bezüglich des Investitionsverhaltens lässt sich feststellen, dass der Großteil der Investitionen von insgesamt 2 209,7 Mio Euro im Bereich der Baugeräte, Maschinen und Anlagen getätigt wird (1 986,8 Mio EUR; vgl. Tab. 3-8.5)⁹ – Maschinen und Anlagen sind damit die mit Abstand wichtigste Anlageninvestition im Baugewerbe. Im Vergleich dazu betragen die Abschreibungen 2008 ca. 1 500 Mio EUR, erreichten also insgesamt nur etwa 65% dieses Umfangs, während diese Quote 1997 noch bei 97% lag – es wurden damals also fast ausschließlich Ersatzinvestitionen getätigt.¹⁰ Diese Entwicklung setzt damit den positiven Trend zu mehr Erweiterungs- und Rationalisierungsinvestitionen in der Bauwirtschaft fort.

Mitarbeiter	Bauhaupt- gewerbe	Ausbau- gewerbe
Investitionen insgesamt (Mio €)	1 752,3	557,4
Davon in technische Anlagen und Maschinen (Mio € /% an Gesamtinvestitionen)	1 506,9/ 86,0%	479,9/ 86,1%

Tab. 3-8.5 Investitionsverhalten im Baugewerbe 2007¹¹

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Innenausbau“

Eine spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Innenausbau“ entfällt an dieser Stelle, da keine weiterführende Differenzierung auf Basis der statistischen Daten möglich ist. Im Folgenden wird der Bereich „Innenausbau“ als Teilbereich des Ausbaugewerbes aufgefasst – der jedoch je nach Service-

⁹ Wobei die Investitionsquoten in Bezug zum Umsatz insgesamt bei unter 3% liegen.

¹⁰ Vgl. im Folgenden Statistisches Bundesamt (2006): Strukturwandel im Baugewerbe. *Wirtschaft und Statistik* 8/2006. (www.destatis.de)

¹¹ Datenbasis hier 2007, da keine derart detaillierten Daten für 2008 verfügbar. Statistisches Bundesamt (2010): *Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe 2007* (Fachserie 4 Reihe 5.3). (www.destatis.de). Da in der *Kostenstruktur 2007* auf der Warengruppenklassifikation 2003 (WZ2003) basiert, im Gegensatz zur *Kostenstruktur 2008*, bei der die WZ2008 eingeführt wurde, entfällt hier der Bereich „Erschließung von Grundstücken; Baulträger“ als eigener Posten.

roboter-Szenario unterschiedlich abgegrenzt werden kann.

Struktur der Betriebe	
Elektroinstallation	23%
Gas, Wasser, Lüftung etc	34%
Dämmung	4%
Sonstige Bauinstallation	3%
Verputzerei, Gipserei etc	4%
Bautischlerei/-schlosserei	8%
Fliesen-/Plattenlegerei	7%
Malerei/Glaserei	17%
Sonstiger Ausbau	1%

Tab. 3-8.6 Struktur der Betriebe im Bereich Innenausbau 2008¹²

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Serviceroboter-Anwendungsfall bezieht sich ausschließlich auf Trockenbautätigkeiten im Innenausbau mittlerer bis großer Gebäude, bei denen eine hohe Anzahl an Trockenbauplatten an den Wänden, Decken oder als Zwischenwände im Raum verbaut werden sollen. Vor diesem Hintergrund wird auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-8.7):¹³

- Der statistisch relevante Sektor ist zunächst das Ausbaugewerbe (WZ 43.2, 43.3).
- Von den hier relevanten Betrieben wird angenommen, dass nur solche, die in den Bereichen „Dämmung“ oder

¹² Vgl. Statistisches Bundesamt (2010): *Statistisches Jahrbuch 2010*. (www.destatis.de)

¹³ Vgl. Statistisches Bundesamt (2010): *Statistisches Jahrbuch 2010*.; Statistisches Bundesamt (2010): *Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe 2008* (Fachserie 4 Reihe 5.3)



01

02

03

04

05

06

07



08

09

10

11

INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

„Verputzerei/Gipserei etc.“ tätig sind, auch für den hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsfall relevant sind. Dies trifft gemäß Tab. 3-8.6 für etwa 8% der Betriebe zu.¹⁴

- Gleichzeitig müssen sie in der Lage sein, die für die Serviceroboter-Investitionen notwendigen, finanziellen Mittel aufzubringen. Dies erscheint erst für Unternehmen mit einer Größe von mindestens 250 Mitarbeitern plausibel.¹⁵ Demnach sind etwa 5 Betriebe als potenzielle Käufer relevant.¹⁶

Unternehmen im Ausbaugewerbe	6 422
davon im Innenausbau tätig	514
davon mehr als 250 Mitarbeiter und im Innenausbau tätig	~5

Tab. 3-8.7 Ableitung des relevanten Zielmarkts

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 5 Unternehmen als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-8.8):

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme für Maschinen und Anlagen wird mit 3 212 Tsd Euro

¹⁴ Schätzung. In Ermangelung geeigneter Daten auf Unternehmensebene werden die Daten auf Betriebsebene im Folgenden als Grundlage für eine Schätzung der Daten auf Unternehmensebene verwendet.

¹⁵ Schätzung. Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit durch die hier betrachteten Unternehmen. Bei der hier betrachteten SR-Investition sind Mittel in Höhe von mindestens 190,4 Tsd Euro notwendig. Zwar stellt die Beschaffung von Maschinen und Anlagen den Schwerpunkt der Investitionstätigkeiten dar, dennoch wird angenommen, dass nicht mehr als ein Drittel der gesamten Finanzmittel für SR-Investitionen verwendet werden. Aus Tab. 3-8.3 und Tab. 3-8.5 ergeben sich durchschnittliche Investitionen von 1,3 Tsd Euro pro Mitarbeiter. Auf dieser Grundlage würden die finanziellen Aufwendungen für einen Serviceroboter erst für Unternehmen mit mindestens 250 Mitarbeitern in einer diesem Anteil entsprechenden Größenordnung fallen ($250 \cdot 1,3 \text{ Tsd Euro} = 326,3 \text{ Tsd Euro}$)

¹⁶ Schätzung. Gemäß Tab. 3-8.4 haben 60 Unternehmen mehr als 250 Mitarbeiter. Davon sind schätzungsweise 8% für das hier betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario relevant.

angenommen.¹⁷

- Weiterhin wird geschätzt, dass etwa ein Drittel der für Maschinen und Anlageninvestitionen verfügbaren Finanzmittel für Serviceroboter-Investitionen verwendet werden könnten. (~1 059,6 Tsd Euro).¹⁸
- Jedes Serviceroboter-System besteht aus einem Serviceroboter. Bei einem Systempreis von 190,4 / 207,3 Tsd Euro (SR-Variante A/B) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~ 6 / 5 Servicerobotern führen – was letztlich zu einer Installed Base von 42 / 35 im eingeschwungenen Marktzustand führen würde (Lebensdauer 7 Jahre).
- Aufgrund der positiven LCC-Betrachtung (vgl. Abschnitt 3.1) sind keine weiteren Abschläge auf das errechnete Marktpotenzial vorzunehmen.

Relevante Betriebe	~5
Brutto Investitionssumme in Maschinen u. Anlagen (T€)	~3 212
davon SR-Investitionen (T€)	~1 059
Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR Systempreis T€ 190,4/207,3; 1 SR pro System)	
errechnet	~6 / 5
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~6 / 5
Errechneter max. Bestand an SR (7 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
errechnet	~42 / 35
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~42 / 35

Tab. 3-8.8 Ableitung des Marktpotenzials (Eigene Schätzungen)

¹⁷ Schätzung: Aus Tab. 3-8.4 und Tab. 3-8.5 ergeben sich durchschnittliche Investitionen von 1 305 Euro pro Mitarbeiter. Auf dieser Grundlage kann abgeschätzt werden, dass den Betrieben mit 250 – 499 Mitarbeitern ~489,6 Tsd Euro (= $375 \cdot 1 305 \text{ EUR}$), denen mit 500 – 999 Mitarbeitern ~979,1 Tsd Euro (= $750 \cdot 1 305 \text{ EUR}$) und denen mit mehr als 1000 Mitarbeitern ~1 305 Tsd Euro (= $1 000 \cdot 1 305 \text{ EUR}$) zur Verfügung standen. Der hier errechnete Gesamtbetrag ergibt sich aus diesen Werten multipliziert mit den Werten aus Tab. 3-8.4 korrigiert um den Anteil der hier relevanten Betriebe (8%; vgl. Abschnitt 4.2.1).

¹⁸ In Ermangelung geeigneter Daten. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.1.1 sind etwa zwei Drittel der Finanzmittel für Ersatzinvestitionen notwendig – diese stellen also notwendige Investitionen dar, auf die das Unternehmen nicht zugunsten von anderen Investitionsprojekten verzichten kann. Im Umkehrschluss kann allerdings dementsprechend angenommen werden, dass bis zu einem Drittel dieser Mittel für Rationalisierungsinvestitionen und damit für Serviceroboter zur Verfügung stehen könnten.





INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die Serviceroboter-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zur konventionellen Leistungserbringung bieten.
 - Zum einen sind die Serviceroboter-Varianten schon heute in der Lage, zu deutlich besseren Stückkosten zu produzieren. Auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive heraus sind die Serviceroboter-Varianten deutlich günstiger als die manuelle Alternative. Hinzu kommen die kurzen Amortisationszeiträume der Serviceroboter-Varianten von jeweils etwa 3,5 Jahren.
 - Zum anderen haben die Serviceroboter-Varianten darüber hinaus noch den in dieser Branche überaus wichtigen Mehrwert, die Arbeiter im Rahmen einer körperlich sehr belastenden Tätigkeit zu entlasten. Sie reduzieren damit nicht nur das Krankheitsrisiko, sondern ermöglichen es, ggf. auch ältere Arbeitnehmer länger zu beschäftigen – was gerade vor dem Hintergrund des zu erwartenden, demografischen Wandels von hohem Interesse sein dürfte.
 - Vor diesem Hintergrund kann mit einer hohen Marktakzeptanz der Serviceroboter-Lösungen gerechnet werden, wengleich das für dieses eng abgegrenzte Anwendungsszenario (Trockenbau-Platten) errechnete Potenzial absolut gesehen relativ gering ist. Aufgrund der Universalität der Serviceroboter-Lösung könnten sich weitere erhebliche Anwendungspotenziale bei weiteren Tätigkeiten im Bereich des Innenausbaus ergeben (z.B. Fliesenlegen, Malerarbeiten, Arbeiten im Umfeld von Gas/Wasser, etc.), sodass das hier ausgewiesene Marktpotenzial als untere Grenze zu verstehen ist.
- und sicher erkannt und vermessen werden können.
- Entwicklung und Verbesserung von Schlüsseltechnologien
 - Für den flexiblen Einsatz werden Roboterarme mit einem hohen Verhältnis von Tragkraft zu Kinematik-Eigengewicht benötigt, allerdings bei nur 4-5 DOF. Ideal wäre mindestens 1:1. Dadurch könnten hohe Bearbeitungs- und Tragkräfte aufgebracht werden.
 - Die Roboter benötigen Abstandssensoren für den Klemmschutz, die dynamische kollisionsfreie Bewegungsplanung und die haptische Feinpositionierung von Objekten. Dies muss zuverlässig und in Echtzeit erfolgen.
 - Erkenntnisse der Arbeitsgruppe zur neuen ISO 10218-2011 sollten in das Konzept mit einfließen. Darin werden Sicherheitsanforderungen für die sichere Auslegung von Industrierobotern spezifiziert. Weiterhin müssen auch die Erkenntnisse der neu entstehenden ISO 13482 zur Sicherheit von „personal care robots“, die sich u.a. mit mobilen Assistenzrobotern beschäftigt, mit einbezogen werden. Hier sei auf das [Kapitel 4.2.1](#) für weitere Informationen verwiesen.
 - Mensch-Maschine-Interaktion für die interaktive Steuerung von Robotern
 - Verlässliche Spracherkennung in der Bauumgebung, die Fehlbedienung verhindert und Handlungsanweisungen interaktiv ermöglicht.

5.2 Forschungsbedarf

- Entwicklung von Sensordatenverarbeitung zur sicheren Lokalisierung in und Vermessung von Räumen
 - Ein Raum muss auf Basis von CAD-Informationen schnell





INNENAUSBAUASSISTENZ

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A	SR-Variante B
Mecanum-Plattform inkl. Lithium-Ionen-Akkumulator	50 T€	50 T€
Rotationslaser zum Ausmessen des Raums	1 T€	1 T€
Kreuzlinienlaser zum Projizieren	0,5 T€	0,5 T€
2D-Linienlaser am Arm zum Messen, u. a. für Bohrloch- und Schleifebenenherkennung	3 T€	3 T€
2 Laserscanner an den Plattformen für SLAM	2 x 3 T€	2 x 3 T€
1-DOF vertikale Linearachse für Reichweite Boden/Decke/Wände	10 T€	10 T€
hybride Knickarmkinematik 3-DOF SCARA-Arm	25 T€	25 T€
Ein 2-DOF und ein 1-DOF Modul mit 150 N aufbringbarer Kraft am Endeffektor	10 T€	10 T€
Kraft-Moment-Sensor am finalen DOF	7,5 T€	7,5 T€
3D-Abstandssensor	20 T€	20 T€
Werkzeugwechselsystem	1,5 T€	4,5 T€
Automatisches Wechselmagazin	-	10 T€
Multitool: Bohr-/Schraubwerkzeug	4 T€	4 T€
Schleifwerkzeug	2 T€	2 T€
Kneifwerkzeug	2 T€	2 T€
Absaugvorrichtung für Bohren / Schleifen	1,5 T€	1,5 T€
Interner Steuerungs-PC	1 T€	1 T€
Ladestation	1 T€	1 T€
Akustisches Interface	0,5 T€	0,5 T€
Softwarekosten	146,5 T€	159,5 T€
Summe Gesamtsystem	4 299 800 €	4 299 800 €

Tab. 3-8.9 Anschaffungskosten

SZENARIOSTECKBRIEF

KANALINSPEKTION



09



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG

KANALINSPEKTION

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Kanalroboter werden heute als einfache Manipulatoren leitungsführt eingesetzt. Zu der benötigten Ausrüstung für den Betrieb gehören:

- Operationsfahrzeug
- Einsetzgerät (meistens Kran)
- Leitungsführungsgerät (Haspel)
- Steuergerät für den Manipulator
- Medienversorgung
- Bedienerkonsole mit Monitor und Steuereinrichtungen

Einsatz Kamerawagen



Abb. 3-9.1 Einsetzen eines Kanalinspektionsroboters.

Der Investitionswert beträgt aktuell etwa 100 000 Euro für einfaches Kanal-TV und bis zu 250 000 Euro für Rohrspanierungsgeräte. Ablauf und Bedienung sind wie folgt:

- Für den Betrieb eines Kanalmanipulators werden zwei Fachkräfte benötigt.
- Ein Bediener setzt das Gerät ein und bedient die Leitungshaspel.
- Ein Überwacher steuert das Gerät anhand des Videobilds mit Tasten oder Joystick jeweils in der Richtung und im Vorschub
- Gleichzeitig beobachtet der Überwacher im Videobild die Kanalwände.
- Wenn Schadstellen gefunden werden, startet der Überwacher den Videorekorder und erfragt beim Bediener die eingezogene Haspellänge als Rohrlängskoordinate und notiert die Angabe mit der Sequenznummer am Videorekorder.
- Mit verschiedenen Manipulatoren ist auch eine Bearbeitung/ Reparatur möglich.
- Wenn die maximale Haspellänge oder das Kanalende bzw. der Einstiegspunkt erreicht sind, zieht der Bediener den Roboter an der Haspel aus dem Kanal.

Kanalinspektion mit Kamera



Abb. 3-9.2 Kanalmanipulator mit Kabel; Videobild eines Kanals.



01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Sequenzdiagramm

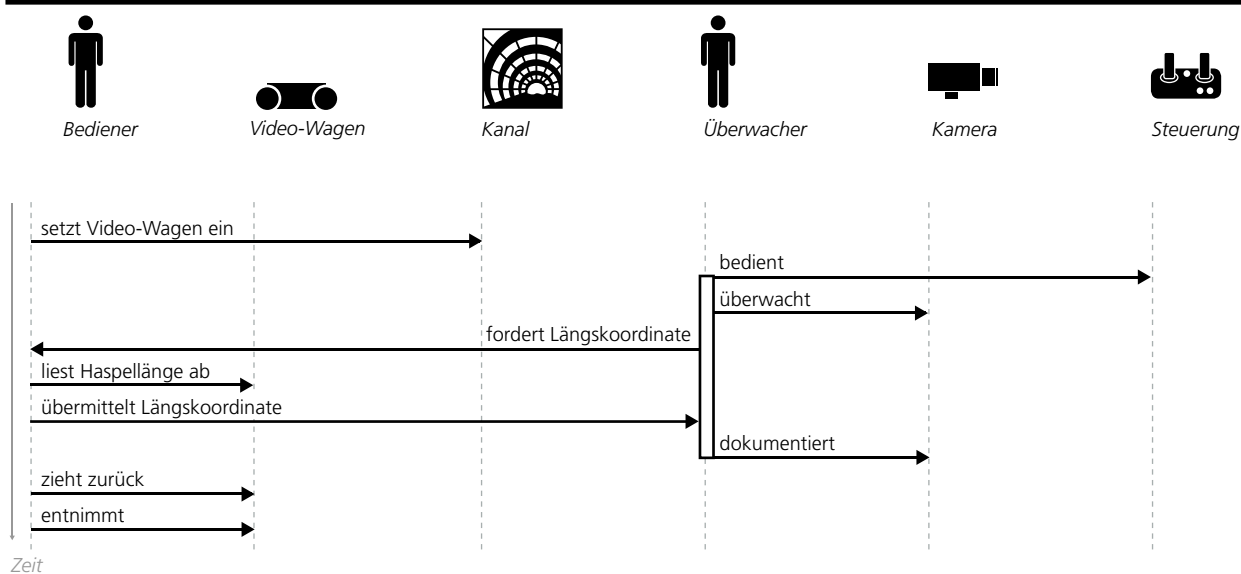


Abb. 3-9.3 Sequenzdiagramm manuelle Kanalinspektion.

Der manuelle Ablauf ist prinzipiell unabhängig vom Inspektionsobjekt (Kanal). Die Manipulatoren werden nicht nur für Abwasserkanäle, sondern generell für unzugängliche Stellen eingesetzt. Es sind grundsätzlich zwei Personen für die Inspektion notwendig. Eine Person handhabt den Manipulator und eine zweite bedient den Manipulator und beurteilt das Kamerabild. Eine Qualifikation oder besondere Kenntnisse waren bisher nicht erforderlich. Wegen der im Folgenden beschriebenen Probleme wird neuerdings eine Qualifizierungsstruktur angestrebt, die dann auch als verbindliche Voraussetzung für Inspektionsarbeiten eingeführt werden soll (Verband der Rohr- und Kanaltechnik-Unternehmen e.V. VDRK).

1.2 Probleme

Die Inspektion ist aus folgenden Gründen unzuverlässig:

- Der Inspektionsumfang und die Dokumentation sind vom Bediener abhängig.
- Die Bewegung wird gleichzeitig mit der Inspektion per Videobild gesteuert; das überlastet u.U. den Überwacher,

insofern ist die Bedienerchnittstelle nur bedingt geeignet.

- Durch den Kabelschlepp ist die Reichweite begrenzt (max. 300m).

Die Inspektion ist personalintensiv:

- Zwei Personen sind permanent (3 h pro 100 m) beschäftigt.
- Wegen der begrenzten Reichweite muss oft zwischen den Kanaleinstiegen umgesetzt werden.

Die bisher eingesetzte Technik der fernbedienten und kabelgesteuerten Manipulatoren stößt zunehmend an wirtschaftliche und technische Grenzen. Der Kabelschlepp begrenzt die Reichweite und die manuelle in-situ Inspektion ist unzuverlässig und mühsam. Insgesamt können mit den derzeit benutzten Techniken die Anforderungen aus aktuellen gesetzlichen Vorgaben zu Frequenz und Umfang von Kanalinspektionen nur technisch unzulänglich und wirtschaftlich unbefriedigend erfüllt werden.

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Rohr- und Kanalwartung mit Servicerobotern wird immer mehr zur

i





KANALINSPEKTION

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Notwendigkeit. Gründe dafür sind:

- Umweltauflagen: Dichtigkeit des Kanalsystems muss nachgewiesen werden.
- Ressourceneinsparungen: offene Sanierung muss durch Prävention vermieden werden.
- Sicherheit: Hohlrumbildung unter Verkehrsflächen muss unbedingt verhindert werden.

Prinzipiell kann die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Wartungs- und Inspektionsprozesse dadurch verbessert werden, dass aus der Servicerobotik bekannte Techniken die Autonomie der Geräte erhöhen. Ziel ist dabei eine Automatisierung des Inspektionsvorgangs selbst und der Ersatz der Beurteilung vor Ort durch eine zentrale Datenauswertung. Als Grundvoraussetzung müssen dabei die Bewegungsfunktionen und die Lokalisierung automatisiert werden. Allein dadurch können die Inspektionskosten durch den Wegfall des häufigen Umsetzens erheblich reduziert werden. Werden darüber hinaus die Prozesse (Kamerahandling, Reinigung, erweiterte Sensorik) als sensorgeführte Roboterlösungen implementiert, kann ein vollautomatischer Betrieb wesentlich effizienter und vor allem zuverlässiger sein, als dies manuell möglich ist.

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

- 500 000 km zu überwachende Abwasserleitungen in Deutschland.
- Investitionsbedarf für Erhalt und Ertüchtigung der bereits in Betrieb stehenden Kanäle wird bis 2020 auf 58 Milliarden Euro in Deutschland geschätzt.
- 30% der Kanäle sind älter als 50 Jahre / 30% jünger als 25 Jahre, etwa 50% müssen intensiv überwacht werden, weil sie sicherheitskritische Infrastruktur darstellen.
- 40% der Inspektionen weisen sanierungsbedürftige Schäden aus.
- Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen wird die Kanalsanierung zunehmend mit Manipulatoren bzw. Robotern

durchgeführt, offene Sanierung verursacht schon bei kurzen Strecken enorme Kosten.

- Neue Normen (EN13508-2) verpflichten Betreiber zu umfassender Inspektion und Nachweis der Dichtigkeit.
- 80% der Kommunen haben deshalb ein neues, jährliches Inspektionsprogramm. Bisher wurden die Kanäle bedarfsweise inspiziert.
- Deshalb gibt es einen wachsenden Bedarf für automatische Kanalrobotik.
- Die Kosten für Inspektion und in-situ Reparatur betragen 110 Euro pro Meter Kanal und Jahr.
- Abschreibungen und Zinsen betragen 45% der gesamten Betriebskosten; Wartung und Instandhaltung verursachen insgesamt 55%.
- Bei kommunalen Abwasserentsorgern verursachen Inspektion und in-situ Reparatur 18% der Personalkosten in den dafür eingerichteten Eigenbetrieben.
- Ca. 50% aller Fremdvergaben der kommunalen Abwasserentsorger sind Leistungen mit konventionellen Kanalmanipulatoren.
- Ca. 100 bundesweite Dienstleister für Rohrsanierung, bei denen 14% der Kosten vor allem durch manuelle Inspektion anfallen.

1.4.2 Einsatzbereich

Die Aufgaben des zukünftigen Kanalroboters umfassen:

- Inspektion von Abwasserleitungen mit dokumentierender Bilderfassung mit integrierter vollständiger Dokumentation und Speicherung der Inspektion
- Zukünftig automatische in-situ Reparatur von detektierten Fehlstellen
- Vollständige und sichere Erfassung des Kanalzustands
- Kritisch ist die zuverlässige Traktion im Kanal (kein Steckenbleiben)
- Andere mögliche Einsatzgebiete und Branchen:
 - Facility Management
 - Öl- und Gaspipelines, Verrohrung in der Prozesstechnik
 - Rohrsysteme für Wärmeübertragung
 - Lebensmitteltechnik





01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Der vorgeschlagene Serviceroboter soll die bisher tele-operierte Kanalinspektion automatisieren und damit die Kanalinspektion wesentlich kostengünstiger machen. Gegenstand der Untersuchung ist ein Autonomiemodul, das für alle Arten von Kanalrobotern eingesetzt werden kann.

- Rohr- und Kanalinspektion
- Kanalreinigung
- Rohrreinigung
- Schleifen (Descaling)
- Leckortung

Die autonome und automatische Kanalinspektionsmaschine „Kanalroboter“ ist auf einen Kanaltyp spezialisiert und für einen individuellen Kanalverlauf mit den Kanalkatasterdaten programmiert. Die Maschine nimmt die Inspektionsdaten, also Bildfolgen, auf und speichert sie für spätere (automatische) Auswertung. Als reguläre Interaktion während der Inspektion

bleibt lediglich, die Maschine am Kanalanschluss einzusetzen und nach Ablauf der Inspektionsfahrt wieder zu entnehmen. Es gibt deshalb keine Probleme mehr mit der Bedienerschnittstelle vor Ort. Die Programmierung der Maschinen anhand von Katasterdaten, zum Beispiel mit dem kommerziellen System IPSISCON ist unkritisch.

Allerdings ist damit auch der Übergang zu einer Systemtechnik verbunden. In dem Konzept „Kanalroboter“ werden die Maschinen für einen individuellen Inspektionsabschnitt unter Zuhilfenahme von Kanaldaten programmiert. Nach der Rückkehr werden die Daten ausgelesen, archiviert und, möglichst automatisch, geprüft. Danach wird die Maschine für einen neuen Inspektionsabschnitt programmiert. Das wird man sinnvollerweise zentral durchführen und dazu ein entsprechendes IT-System benutzen.

Sequenzdiagramm

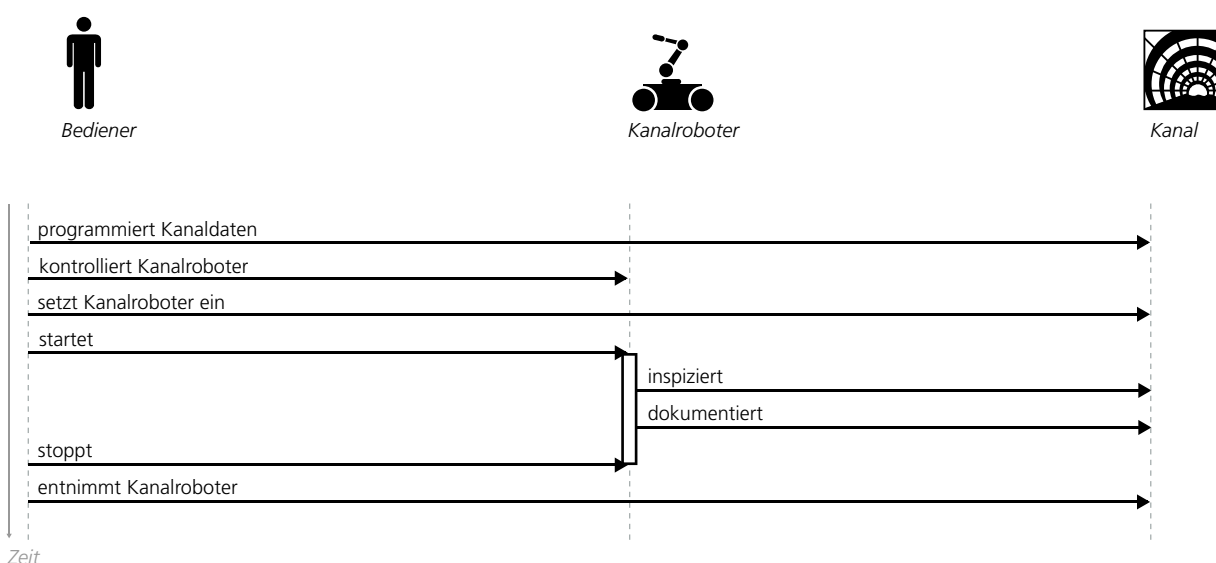


Abb. 3-9.4 Sequenzdiagramm einer autonomen Inspektion.



01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2 Roboterentwurf

Es gibt für jeden Einsatz bereits Geräte unterschiedlichen Typs. Es beginnt mit der sprichwörtlichen „Kamera auf vier Rädern“ und geht bis zu hochkomplexen Robotern mit bis zu zehn Achsen für die Schwemmkanalsanierung.

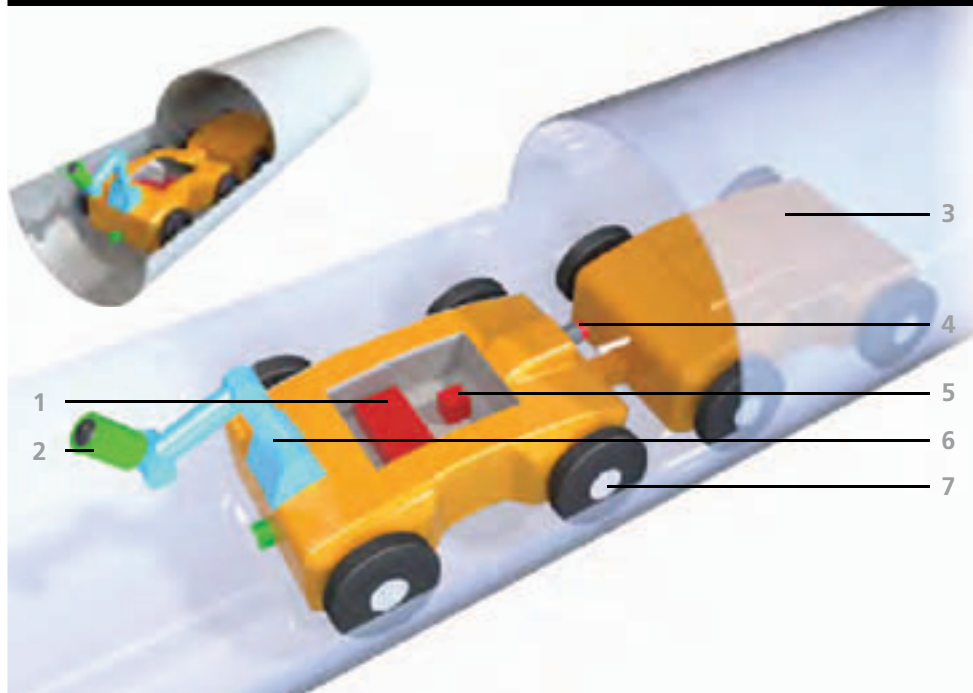
Dabei handelt es sich aber überwiegend um ferngelenkte Manipulatoren mit den in Abschnitt 1.2 beschriebenen Nachteilen. Die konzeptionelle Lösung besteht darin, diese Manipulatoren zu automatisieren. Dies kann durch den Einbau von geeigneten Komponenten aus der Servicerobotik erfolgen.

Roboterentwurf



Abb. 3-9.5 Schwemmkanalsanierung

Roboterentwurf



- 1 Steuerung
- 2 Kamera
- 3 Batterietender
- 4 Radialschanner
- 5 Inklinationssensor
- 6 Roboterarm
- 7 Servoantriebe

Abb. 3-9.6 Autonomer Kanalroboter.





KANALINSPEKTION

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

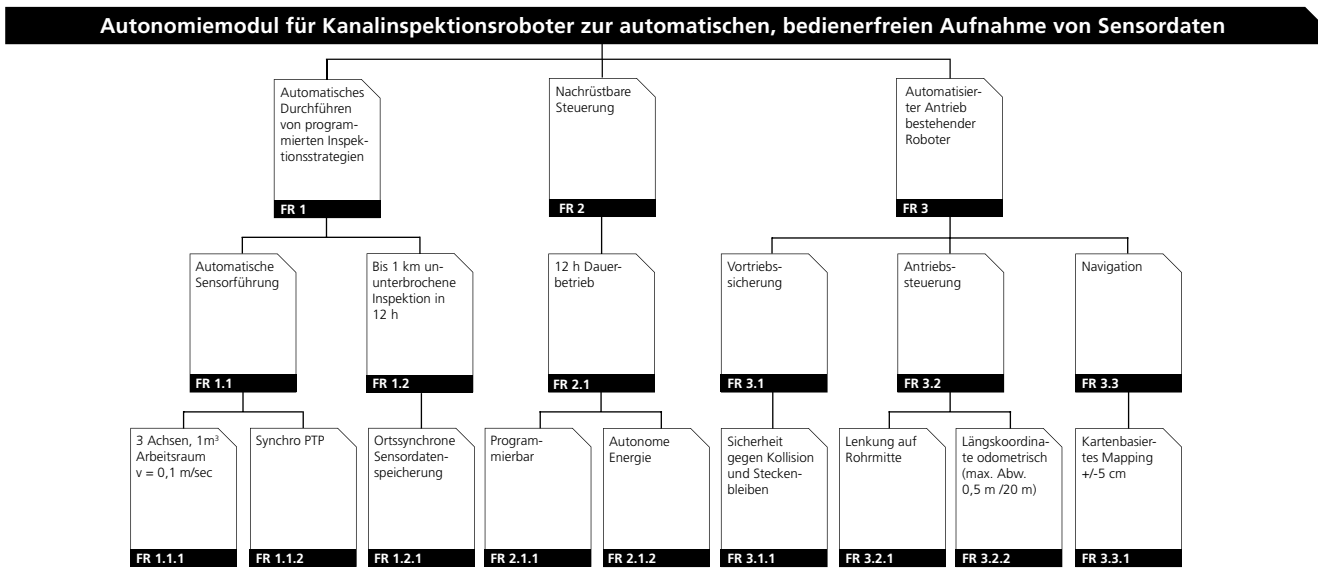


Abb. 3.9-7 Axiomatic Design – Functional Requirements vom Hauptmodul.

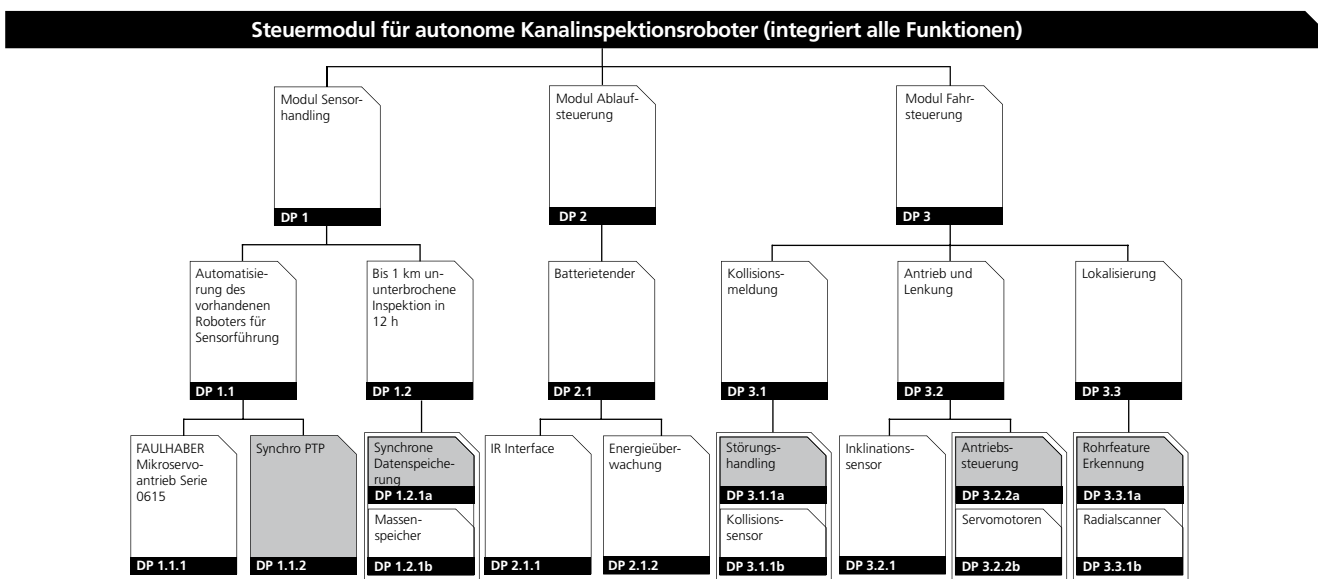


Abb. 3.9-8 Axiomatic Design – Design Parameters vom Hauptmodul



01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Zentrale Hardwarekomponente des Konzepts ist das miniaturisierte Elektronikmodul. Es hat folgende Basis-Funktionen:

- Navigation
- Fahrbetrieb
- Ablaufsteuerung
- Prozesssteuerung
- Kommunikation

Geeignete Rechner- und Peripherieplattformen sind in großer Zahl am Markt erhältlich. Allerdings muss noch eine geeignete Einhäusung (IP67) vorgesehen werden.

Für die Kollisionsvermeidung kann ein handelsüblicher Abstandssensor eingesetzt werden. Im einfachsten Fall genügt ein preiswertes Produkt, das allerdings eingehaut (IP67) werden müsste.

Für die Navigation ist ein Laserscanner notwendig, der das Rohrprofil vermisst. Es gibt diese Scanner am Markt, allerdings sind sie in der Regel nicht für die Kanalumgebung geeignet oder schlicht zu groß. Man kann den Laserscanner aber auch als Inspektionssensor benutzen, weshalb sich ein etwas größerer Aufwand für die Entwicklung einer geeigneten Einhäusung lohnt.

Daneben sind vor allem die Antriebe gegen Varianten mit Encodern auszutauschen.

Einige der handgeführten Inspektionsmanipulatoren sind bereits mit einer eigenen Batterie ausgestattet. Dies ist für funkferngesteuerte Maschinen notwendig und wird auch gelegentlich benutzt, um das Schleppkabel durch geringeres Gewicht verlängern zu können. Auf dem Funktionsmodul werden dazu bis 3 Ah / 6 V in Lithium-Ionen-Technik verbaut. Um die Beweglichkeit im Kanal nicht einzuschränken, bestehen die Maschinen in der Regel aus hintereinander beweglich angebrachten Modulen. Der Bauraum in diesen Modulen wird ebenfalls für die Unterbringung von Batterien benutzt. Passive Tender sind allerdings von der Antriebsleistung des Hauptmoduls abhängig, weshalb in Forschungsrobotern nur angetriebene Tender Verwendung finden. Mit einer autonomen Variante (angetrieben und gesteuert) lassen sich aber fast beliebig lange Züge realisieren und damit auch die Energieversorgung für den autonomen Betrieb des Kanalroboters sicherstellen.

2.2.2 Software

Im oberen Verfeinerungsbereich (DP1, DP2, DP3 in Abb. 3-9.8) sind die Module des Betriebssystems und die Echtzeiterweiterungen eingesetzt. Für das zentrale Betriebssystem wurde aber der Funktionsumfang sehr stark reduziert, weil ein übliches Betriebssystem zu umfangreich für den gewählten Steuerrechner ist. Für die Steuerrechner kommen 8-bit Systeme mit maximal 1 MB Speicher zum Einsatz. Zentrale Aufgabe ist die automatische Aufgabenausführung. Hinzu kommt gegebenenfalls Funktionsuberwachung. Wesentliche Anforderung daran ist die Erstellung der Spezifikation. Daruber hinaus sind auch die Kommunikationsbausteine und das Energieversorgungsmodul eingebaut.

Für die Roboterarmsteuerung (DP 1.1.2) kommen im Wesentlichen Arm- und Kinematikmodule zum Einsatz. Da es sich um eine Synchro-PTP handelt, kann man einfache Konzepte benutzen, die sich leicht auf dem Zielrechner implementieren

TRL / € / FR-Diagramm

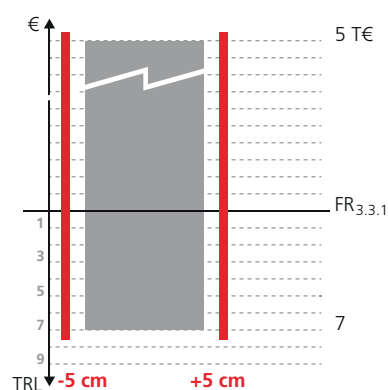


Abb. 3-9.9 Lokalisierung (URG 04)





01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

lassen. Für die Sensordatenerfassung (DP 1.2.1 a) werden Kameramodule sowie Kinematikmodule für die simultane Positionserfassung als Softwarebausteine eingesetzt. Störungserkennung und Strategie (DP 3.1.1 b) wird mit einem Planungsmodul realisiert. Für die Antriebssteuerung (DP 3.2) werden Bausteine für den Inertialsensor sowie Module für Bewegungsplanung und Odometrie verwendet.

Das Navigationsmodul (DP 3.3) beinhaltet Treiber für den Laserscanner sowie die kartenbasierte Navigation. Navigation und Antrieb sind bereits in vielen Varianten verfügbar. Der Aufwand für die Integration ist gering. Da die Navigation sich hier auf eine Koordinate (Rohrlängsrichtung) bezieht, ist die wesentliche Entwicklungsaufgabe, aus den Scans der Rohrhälfte zusammen mit einer Rohrkarte Referenzpositionen für die Odometrie zu gewinnen. Technisch sind diese Verfahren bekannt und erprobt.

Insgesamt werden die Softwareentwicklungskosten für das Robotersystem auf etwa 300 000 Euro geschätzt.

2.2.3 Varianten

Die Roboter sind in der Variation von der Zielplattform abhängig und diese wiederum vom Einsatzumfeld. Grundsätzlich besteht aber großer Bedarf, das Schleppkabel durch möglichst universell verwendbare Tender zu ersetzen. Hinzu kommt, dass für die Realisierung geeigneter Strategien bei Störungen eine Rückwärtsfahrfunktion sehr hilfreich wäre. Dazu braucht man einen autonomen Tender. Dieser autonome Tender ist eine im Verbund mit verschiedenen Kanalrobotern einsetzbare eigenständige Variante mit folgenden Funktionen:

- Rückwärtsfahrt
- Entlastung der Hauptantriebe
- Energie- und Medienversorgung (Extension)
- Abschleppen havarierter Kanalroboter

Die dafür benötigte Ausrüstung lässt sich aus dem Axiomatic Design des Inspektionsroboters durch Downscaling ableiten. Sie enthält praktisch nur eine gravimetrische Lageregelung. Damit kann im Notbetrieb bereits nur mit Odometrie eine Ausschleusstelle erreicht werden. Im regulären Rückwärtsbetrieb kann die Navigation über das Steuermodul des Inspektionsroboters erfolgen.

i





KANALINSPEKTION

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.1.1 Roboterarm 3 Achsen,	< 1 m Arbeitsraumbegrenzung v = 0,1 m/sec	DP 1.1.1 Microservoantriebe	~ 300 €	7	1	Tragkraft für bildgebende Sensoren / Baugröße
FR 1.1.2 Bewegungssteuerung für Roboter	keine, Standardalgorithmen verwendbar	DP 1.1.2 Synchro PTP Steuerung	400 €	9	1	
FR 1.2.1 b ortsynchrone Sensordatenspeicherung Speichermedium	Datenspeicherung über den gesamten Inspektionszeitraum	DP 1.2.1 b Datenspeicherung auf Massenspeicher	300 €	9	2	
FR 1.2.1 a ortssynchrone Sensordatenspeicherung Software	Datenspeicherung über den gesamten Inspektionszeitraum	DP 1.2.1 a Komprimierung von Bilddaten	200 - 400 €	7	2	Datenmenge / Bauraum und Energiebedarf
FR 2.1.1 Programmierbar	Bauraum Energiebedarf	DP 2.1.1 Mikrocontroller mit IR Interface	200 €	9	2	Leistung / Bauraum
FR 2.1.2 Autonome Energie	autonomer Betrieb 12 h	DP 2.1.2 Energieüberwachung	250 €	8	2	Kapazität / Bauraum
FR 3.1.1 b Sicherheit gegen Kollision und Steckenbleiben	Erkennung von Hindernissen	DP 3.1.1 a/b Kollisionssensor	50 €	9	1	
FR 3.1.1 a Sicherheit gegen Kollision und Steckenbleiben	Reaktion auf Hindernisse	DP 3.1.1 a Software Störungshandling		7	2	
FR 3.2.1 Lenkung auf Rohrmitte	autonome Lenkung	DP 3.2.1 Inklinationssensor	50 €	8	2	
FR 3.2.2 b Längskoordinate odometrisch	0,5 m / 20 m	DP 3.2.2 b Antriebssteuerung mit Servomotoren	300 €	7	2	
FR 3.2.2 a Längskoordinate odometrisch	0,5 m / 20 m	DP 3.2.2 a/b Odometrie Software		8	2	wasserdichte Kapselung / Bauraum
FR 3.3.1 b Kartenbasiertes Mapping	+/- 5 cm	DP 3.3.1 b Radialscanner	5 000 €	8	2	erhöhte Kosten für wasserdichte Kapselung
FR 3.3.1 a Kartenbasiertes Mapping		DP 3.3.1 a Rohr-Merkmalserkennung		6	2	wasserdichte Kapselung / Bauraum

Tab. 3-9.1 Komponenten-Übersicht



KANALINSPEKTION

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

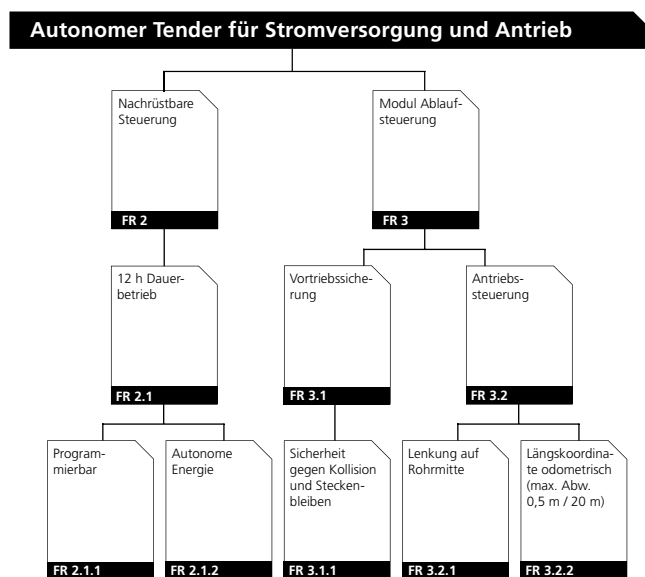


Abb. 3-9.10 Axiomatic Design – Functional Requirements für autonomen Tender.

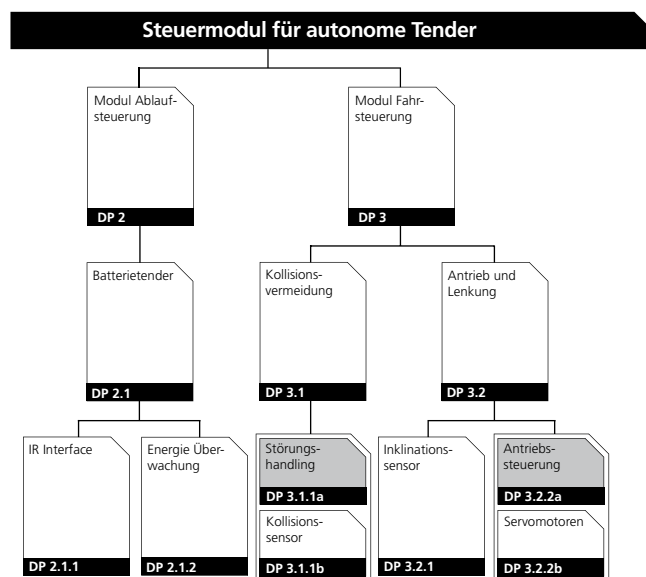


Abb. 3-9.11 Axiomatic Design – Design Parameters für autonomen Tender.



01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B		Konventioneller Manipulator	
Grunddaten Use Case						
• Lebensdauer (a)	7		1		-	
• Anzahl Roboter (System)	1		2 080		-	
• Eff. Produktivzeit (h/a)	1 040		0		-	
• Personalstunden (h/a)	0		520 000		-	
• Inspektionsleistung (m/a)	260 000				260 000/520 000	
LCC-Summe (T€)	404,5	100,0%	519,6	100,0%	1 820/3 640	100,0%
• Investition	146,0	36,1%	213,6	41,1%	-	0%
• Installationskosten	4,0	1,0%	4,0	0,8%	-	0%
• Aktivitätskosten	124,3	30,7%	124,5	24,0%	1 820/	100%
• Wartung/Instandhaltung	130,2	32,2%	177,5	34,2%	3 640	
• Andere	-	-			-	-
DCF (@10%, T€)	-327,0		-427,7		-1 265,8/-2 531,6	
Softwarekosten (T€)	300,0		300,0			
Leistungskosten (€/m)	0,22		0,14		1,00	

Tab. 3-9.2 LCC

Erläuterung zu Tab. 3-9.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tab. 3-9.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Serviceroboter-Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Systems ausgegangen (52 Wochen, werktags). Im Gegensatz zur konventionellen Alternative wird das System von den Stadtwerken selbst betrieben.¹ Das System wird in einem Einschicht-Modell bei 4 h Schichtdauer eingesetzt (ein Einsatz pro Arbeitstag) – zum Betrieb des Systems sind keine weiteren Personen notwendig. Die Verfügbarkeit des Systems wird mit 100% angesetzt (bei der kurzen Einsatzdauer des Systems hat ein technischer Ausfall keine Auswirkung auf die effektive Produktivzeit), so dass die effektive Produktivzeit 1 040 h/a beträgt. Das System hat eine Inspektions-

leistung von mind. 250 m/h (jährliche minimale Reinigungs-/ Inspektionsleistung 260 000 m bei Volllastung).

SR-Variante B: Bei SR-Variante B handelt es sich zwar um eine eigenständige SR-Lösung, sie ist aber im Grunde nur eine Erweiterung der SR-Variante A im Sinne eines Zusatzmoduls („Tender“), mit der die Reichweite/Einsatzbereitschaft des Systems verdoppelt werden kann. Auf dieser Grundlage werden 8 h-Schichten möglich (jährliche Reinigungsleistung 520 000 m bei Volllastung).

Konventionelle Alternative: Heute wird die tatsächliche Inspektion durch selbstständige Klein- und Kleinstunternehmen mit einfachen Kamerawagen zu festvereinbarten, leistungs-basierten Preisen durchgeführt (1 Euro/m Inspektionskosten). Aus Sicht des Stadtwerks handelt es sich dabei um externe Kosten (Outsourcing). Die maximale Inspektionsleistung liegt bei effektiv 75 m/h (3 h für 300 m plus je 0,5 h für Vor-/ Nachbereitung).

Um dies mit den SR-Varianten vergleichen zu können, wird die

¹ Annahme: Die oftmals sehr kleinen Servicebetriebe werden die für die Investition notwendigen Finanzmittel nicht aufbringen können.



KANALINSPEKTION

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

abgerufene Inspektionsleistung durch die Stadtwerke auf einen mit den SR-Varianten vergleichbaren Wert gesetzt (260 000 m / 520 000 m).

Investition: Bei dem Grundsystem handelt es sich um ein mit der konventionellen Alternative vergleichbares System. Dieses wird um weitere Komponenten ergänzt (112,3 Tsd Euro pro Serviceroboter) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

SR-Variante B: Der Tender wird mit 52 Tsd Euro veranschlagt – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators. Ansonsten keine Änderungen.

Konventionelle Alternative: Entfällt (wegen Externvergabe).

Installationskosten: Da es sich um ein Plug&Play-System handelt, fallen keine Kosten für die Planung und (Erst-) Einrichtung des Systems an. Für die Schulung des internen Technikpersonals wird jeweils ein externer Personalaufwand von 5 PT (40 Ph) angesetzt. Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen (100 Euro/Ph).

SR-Variante B: Keine Änderung.

Konventionelle Alternative: Entfällt (wegen Externvergabe).

Aktivitätskosten: Während der Produktivzeit fallen keine Personalkosten an. Die in den Nebenzeiten notwendigen Tätigkeiten (Programmierung, Vor-/Nachbereitung; Transfer zum und vom Einsatzort) werden mit 2 h pro Schicht (= Einsatz) veranschlagt und von internem Techniker übernommen. Die entsprechenden Personalkosten werden mit 34 Euro/h verrechnet (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten). Der Energieverbrauch beträgt 0,225 kW pro Roboter² während der Produktivzeit (234 kWh/a; 0,14 Euro/kWh).

SR-Variante B: Keine Änderung.

Konventionelle Alternative: Ergibt sich aus dem Kostensatz von 1 Euro/m und der im Jahr abgerufenen Inspektionsleistung.

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von

100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten werden auf 10% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

SR-Variante B: Keine Änderung.

Konventionelle Alternative: Entfällt (wegen Externvergabe).

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik ([s. Kap. 2.3.1.2](#) Abschätzung von Softwareentwicklungskosten) 300 Tsd Euro sowohl für SR-Variante A als auch für SR-Variante B.

3.1.2. Einschätzung

- Bei der vorliegenden Vergleichsrechnung wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die Stadtwerke das System selbst betreuen – es handelt sich also um eine „in-Sourcing“ Entscheidung, bei der die interne Erbringung der Leistung mit der Externvergabe (→ Status quo) verglichen wird. Aufgrund des großen Bedarfs an Inspektionsleistung (500 000 km Leitungsnetz) kann immer von einer Vollausslastung des Systems ausgegangen werden.
- **Kostenstruktur:** Die SR-Varianten unterscheiden sich nur in ihren Anschaffungskosten – diese machen allerdings den Großteil der Lebenszykluskosten aus (~40%). Die marginalen Unterschiede in den SR-Varianten resultieren alleine aus der unterschiedlichen Einsatzdauer der Systeme sowie den Anschaffungskosten. Skaleneffekte auf Seiten der Serviceroboter-Komponenten könnten demnach einen Hebel zur weiteren Steigerung der Wirtschaftlichkeit darstellen.
- **Wirtschaftlichkeit:** Nach der vorliegenden LCC-Betrachtung sind alle SR-Varianten hinsichtlich ihrer Leistungskosten deutlich günstiger gegenüber der externen Vergabe der Inspektionsleistung (Inspektionskosten von 0,22/0,14 vs. 1,00 Euro/m). Auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF sind die SR-Varianten deutlich günstiger (-327,0 / -427,7 Tsd Euro vs. -1 268,8/-2 531,6).³ Bezüglich der laufenden Kosten führen die SR-Varianten A bzw. B im Vergleich zur konventionellen

³ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

² Inklusive Verlustleistung durch Laden der Batterien



01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Alternative zu einer Ersparnis von 1 565,5 bzw. 3 337,9 Tsd Euro, so dass bei 7 Jahren Lebensdauer eine Amortisation der Investition rechnerisch in jeweils deutlich unter einem Jahr möglich ist.⁴

- **Sensitivität:** Aufgrund der wirtschaftlichen Überlegenheit der Serviceroboter-Lösung sind Skaleneffekte an dieser Stelle irrelevant. Da die wirtschaftliche Überlegenheit der SR-Varianten im Wesentlichen auf den Vollastannahmen beruhen, kommt als für eine Sensitivitätsanalyse relevanter Parameter insbesondere die im Jahr notwendige Inspektionsleistung in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Varianten ähnlich und proportional oder sind im Vergleich zu dem Gewicht bzgl. der Aktivitätskosten irrelevant):
 - Selbst bei einer Viertelung der Inspektionsleistung der Serviceroboter (250m/h auf 62,5m/h; 65 000 m/a) liegen die Kosten der SR-Variante A mit 0,97 Euro/m noch unter denen der Fremdvergabe – bei einer Kostenersparnis von 184,4 über den gesamten Lebenszyklus ist dabei eine Amortisation gerade noch innerhalb der Lebensdauer möglich.

3.2 Nutzwert

- Die jeweilige Einsatzzeit ist weitgehend unabhängig vom Personalaufwand.
- Inspektionen sind vollständig und nicht vom Bediener abhängig.
- Die gesamte Inspektion ist dokumentiert und erfolgt off-line und automatisch (wichtig für die Erfüllung von neuen Normen).
- Es können nicht-visuelle Prüfverfahren benutzt werden (meistens langsam und daher manuell unwirtschaftlich).
- Fehlstellen können durch die autonome Navigation genauer lokalisiert werden.

⁴ Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante = $1\,820 - (124,3 + 130,2) = 1\,565,5 \gg (146,0 + 4,0)$. Amortisationsdauer = $(146,0 + 4,0) / 1\,565,5 \cdot 7 = 0,67$



KANALINSPEKTION

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Energie- und Wasserversorgung“

Statistisch wird der Markt „Energie- und Wasserversorgung“ hier auf Basis der Wirtschaftszweige „Elektrizitäts-“, „Gas-“ und „Wasserversorgung“ (WZ 35.1, 35.2, 36.0) sowie der „Abwasserentsorgung“ (WZ 37.0) abgegrenzt.⁵ Wesentliche Strukturdaten fassen Tab. 3-9.3 und Tab. 3-9.4 zusammen.

	Elektrizität	Gas	Wasser	Abwasser
Unternehmen	1 122	247	1 710	1 260
Beschäftigte	195 207	16 551	41 129	32 359
Umsatz (Mrd €)	284 654	67 445	10 179	8 147
Investitionen (Mrd €)	8 326	1 132	2 404	2 324
Investitionen (in Prozent am Umsatz)	2,9%	1,7%	23,6%	28,5%

Tab. 3-9.3 Strukturdaten Energie- und Wasserversorgung 2008⁵.

2008 zählte der Markt „Energie- und Wasserversorgung“ mehr als 4 300 Unternehmen, die mit ca. 285 000 Beschäftigten einen Umsatz von mehr als 370 Mrd Euro erwirtschafteten.

Betrachtet man die Verteilung der Unternehmen nach Größenstrukturen in diesem Markt (vgl. Tab. 3-9.4), so unterscheiden sich diese je nach Teilmarkt deutlich voneinander. Während im Bereich der Energieversorgung große Unternehmen (50 und mehr Mitarbeiter) jeweils mehr als ein Drittel aller Unternehmen ausmachen, so sind die Teilmärkte Wasserversorgung/Abwasserentsorgung deutlich weniger konzentriert: Hier machen Großbetriebe jeweils weniger als 10% aus – Kleinstbetriebe (weniger als 10 Mitarbeiter) stellen dagegen mit einem Anteil von jeweils mehr als 60% die mit Abstand größte Gruppe dar.

Mitarbeiter	Elektrizität	Gas	Wasser	Abwasser
0 – 9	351	102	1 086	800
10 – 19	99	28	256	241
20 – 49	210	48	209	128
50 – 249	318	69*	139	64
250 und mehr	144	-	20	27

* Geschätzt. Keine detaillierten Zahlen für 50 und mehr verfügbar

Tab. 3-9.4 Größenstrukturen „Energie- und Wasserversorgung 2008“⁶

Investitionsverhalten:

Wie schon Tab. 3-9.3 entnommen werden kann, scheinen die Teilmärkte Wasserversorgung/Abwasserentsorgung gemessen an den Investitionsquoten am Umsatz mit jeweils deutlich über 20% wesentlich kapitalintensiver zu sein als die Teilmärkte Energie- und Gasversorgung mit jeweils weniger als 3% Investitionen am Umsatz. Detaillierte Daten zum Investitionsverhalten im Gesamtmarkt „Energie- und Wasserversorgung“ können Tab. 3-9.5 entnommen werden.

⁵ Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de)

⁶ Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de)



KANALINSPEKTION

→ 4 MARKTDATEN

Mitarbeiter	Elektrizität	Gas	Wasser	Abwasser
Investitionen insgesamt (Mrd €)	8 326	1 132	2 404	2 324
davon in technische Anlagen und Maschinen (Mrd €/Prozent an Gesamt Investitionen)	7 279/ 87,4%	988/ 87,3%	2 104/ 87,5%	1 994/ 85,5%
nach Mitarbeiter				
0 – 9	220	33	490	555
10 – 19	106	24	224	295
20 – 40	239	134	343	217
50 – 249	1 041	797*	560	345
250 und mehr	5 674	-	487	581
davon in technische Anlagen und Maschinen (in Prozent am Umsatz)	87,4%	87,3%	87,5%	85,8%
nach Mitarbeiter	2,6%	1,5%	20,7%	24,5%
0 – 9	1,7%	2,3%	27,6%	29,5%
10 – 19	3,4%	4,5%	29,6%	31,4%
20 – 40	2,3%	2,6%	23,8%	26,4%
50 – 249	1,5%	1,3%	21,3%	25,7%
250 und mehr	3,0%	-	13,6%	18,4%

* Geschätzt, keine detaillierten Zahlen für 50 und mehr verfügbar.

Tab. 3-9.5 Investitionsverhalten Energie- und Wasserversorgung 2008⁷

Insgesamt stellen Investitionen in Maschinen und Anlagen mit einem Anteil von jeweils mehr als 85% an den Gesamtinvestitionen den Schwerpunkt der Investitionstätigkeiten dar. Dabei kann beobachtet werden, dass gerade die kleineren Unternehmen in den einzelnen Teilmärkten (0 – 9 und 10 – 19 Mitarbeiter) deutlich über dem jeweiligen Durchschnitt des Teilmarktes liegen – mit Ausnahme der Betriebe mit weniger als 10 Mitarbeitern im Teilmarkt Elektrizität.

7 Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008* (Fachserie 4 Reihe 6.1) (www.destatis.de)

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Kanalreinigung“

Eine spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Kanalreinigung“ entfällt an dieser Stelle, da keine weiterführende Differenzierung auf Basis der statistischen Daten möglich ist bzw. keine detaillierteren Studien verfügbar sind. Eine Indikation für die benötigte Kanalreinigungs- und Inspektionsleistung liefert allerdings die Statistik zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung des Statistischen Bundesamtes (vgl. Tab. 3-9.6): Demnach sind mehr als die Hälfte der insgesamt ca. 540 000 km Kanalnetz älter als 30 Jahre und weisen daher einen erhöhten Inspektionsbedarf auf. Insgesamt verzeichnet Deutschland 6 906 Kanalbetreiber – darunter fallen alle Unternehmen der öffentlichen Wasserversorgung oder Abwasserbeseitigung (vgl. Tab. 3-9.3) sowie die für die öffentliche Wasserversorgung und die öffentliche Abwasserbeseitigung zuständigen Gemeinden.⁸

nach Baujahr	∑	vor 1960	1961 – 1980	1981 – 2000	2001 – 2007	unbekannt
in km	540 723	73 835	138 485	164 481	59 491	104 430
in Prozent	100%	14%	26%	30%	11%	19%

nach Art	∑	Mischwasser	Schmutzwasser	Regenwasser
in km	540 723	239 086	187 264	114 373
in Prozent	100%	44%	35%	21%

Tab. 3-9.6 Kanalnetz nach Baujahr und Art für Deutschland 2008⁹

8 Statistisches Bundesamt (2009): *Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007* (Fachserie 19 Reihe 2.1) (www.destatis.de)

9 Statistisches Bundesamt (2009): *Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007* (Fachserie 19 Reihe 6.1) (www.destatis.de)



01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 4 MARKTDATEN

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Serviceroboter-Anwendungsfall bezieht sich ausschließlich auf die Betreiber von Kanalnetzen. Aus diesem Grund wird auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes der hier relevante Teilmarkt wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-9.7):¹⁰

- Statistisch relevante Sektoren sind alleine die Wirtschaftszweige „Wasserversorgung“ (WZ 36.0) sowie „Abwasserentsorgung“ (WZ 37.0).¹¹
- Es wird angenommen, dass sämtliche dieser Unternehmen Kanalnetze betreiben. Gleichzeitig müssen sie in der Lage sein, die für die Serviceroboter-Investitionen notwendigen, finanziellen Mittel aufzubringen. Dies erscheint erst für Unternehmen mit einer Größe von mindestens 50 Mitarbeitern plausibel.¹²

¹⁰ Statistisches Bundesamt (2010): *Strukturerhebungen im Bereich Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen 2008 (Fachserie 4 Reihe 6.1)* (www.destatis.de).

¹¹ Kanalnetze werden tatsächlich sowohl von Unternehmen als auch von Gemeinden betrieben. Die Gesamtzahl der Kanalnetzbetreiber wird allerdings nur für beide Betreibergruppen zusammen ausgewiesen (vgl. Abschnitt 4.1.2). Da allerdings die Strukturstatistik mit den hier relevanten Daten zu dem Investitionsverhalten nur für die erste Gruppe verfügbar ist (vgl. Abschnitt 4.1.1), werden die Gemeinden als Betreiber von Kanalnetzen hier vernachlässigt.

¹² Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit durch die hier betrachteten Unternehmen. Bei der hier betrachteten SR-Investition sind Mittel in Höhe von mindestens 146,0 Tsd Euro notwendig. Aufgrund der hohen Kapitalintensität in diesen Branchen wird davon ausgegangen, dass nicht mehr als 5 - 10% der gesamten Investitionssumme für Serviceroboter zur Verfügung stehen. Erst Unternehmen mit 50 und mehr Mitarbeitern liegen mit ihren durchschnittlichen Investitionen in einer diesem Wert entsprechenden Größenordnung von deutlich über 2 000 Tsd Euro. (vgl. Tab. 3-9.4 und Tab. 3-9.5).

Unternehmen	∑ Wasser	Abwasser
davon mit mehr als 50 Mitarbeitern	250	159
		91

Tab. 3-9.7 Ableitung des relevanten Zielmarkts¹³

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 250 Unternehmen als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-9.8):

- Die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme für Maschinen und Anlagen betrug 1 973 000 Tsd Euro 2008.¹⁴
- Weiterhin wird geschätzt, dass aufgrund der hohen Kapitalintensität maximal 5% für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen (~98 650 Tsd Euro).¹⁵
- Jedes Serviceroboter-System besteht aus einem Serviceroboter mit Peripherie. Bei einem Systempreis von 146,0/213,6 Tsd Euro (SR-Variante A/B) könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ~ 676/462 Servicerobotern führen – was letztlich zu einer Installed Base von 4 732/3 234 im eingeschwungenen Marktzustand führen würde (Lebensdauer 7 Jahre).
- Demnach würden den Unternehmen je nach SR-Variante eine Inspektionsleistung von insgesamt 1 230 320/1 681 680 km pro Jahr zur Verfügung stehen – die so verfügbare Inspektionskapazität würde reichen, das gesamte Leitungsnetz zwei bis drei Mal jährlich zu prüfen.¹⁶ Dies ist nicht plausibel.

¹³ Vgl. Tab. 3-9.5

¹⁴ Vgl. Tab. 3-9.5

¹⁵ In Ermangelung geeigneter Daten. Es wird davon ausgegangen, dass der Großteil dieser Investitionssumme für den Erhalt und Ausbau bestehender Anlagen aufgewandt werden muss – sie also notwendige Investitionen darstellen, auf die das Unternehmen nicht „verzichten“ kann. Daher wird ein niedriger SR-Anteil an den Investitionen angesetzt.

¹⁶ Jährliche Inspektionsleistung ca. 260/520 km pro Jahr (SR-Variante A/B); Gesamtlänge des Leitungsnetzes ca. 540 000 km (vgl. Abschnitte 3.1 und 4.1.2).





01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 4 MARKTDATEN

Unterstellt man einen notwendigen Inspektionsturnus des gesamten Leitungsnetzes von 5 Jahren (also ~108 000 km pro Jahr), so ergibt sich ein dafür notwendiger Bestand (Installed Base) von 415 / 207 Servicerobotern bzw. ein jährliches Absatzpotenzial von 59 / 30 Servicerobotern pro Jahr.

- Aufgrund der positiven LCC-Betrachtung (vgl. Abschnitt 3.1) sind keine weiteren Abschläge auf das errechnete Marktpotenzial vorzunehmen. Auch der rechnerische Bestand von ~16 / 12 Servicerobotern pro Kanalbetreiber erscheint im Verhältnis zur notwendigen Inspektionsleistung plausibel.¹⁷

Relevante Betriebe	~250
Brutto Investitionssumme in Maschinen u. Anlagen (T€)	~1 973 000
davon SR Investitionen (T€)	~98 650
Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR Systempreis T€ 146,0/ 213,6; 1 SR pro System) errechnet	~676 / 462
real (max. 108 000 km Inspektionsleistung pro Jahr)	~59 / 30
Errechneter max. Bestand an SR (7 Jahre Lebensdauer eines Systems)	~4 732 / 3 234
real (max. 108 000 km Inspektionsleistung pro Jahr)	~415 / 207

Tab. 3-9.8 Ableitung des Marktpotenzials (Eigene Schätzungen).¹⁸

¹⁷ Bei der hier angenommenen Installed Base im eingeschwungenen Marktzustand könnten diese Serviceroboter 1 062 800 / 1 536 080 km des Netzes inspizieren.

¹⁸ In Ermangelung geeigneter Daten. Es wird davon ausgegangen, dass der Großteil dieser Investitionssumme für den Erhalt und Ausbau bestehender Anlagen aufgewandt werden muss – sie also notwendige Investitionen darstellen, auf die das Unternehmen nicht „verzichten“ kann. Daher wird ein niedriger SR-Anteil an den Investitionen angesetzt





KANALINSPEKTION

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zur aktuell üblichen Fremdvergabe der Inspektionsleistung für die Stadtwerke (als Kanalbetreiber) darstellen.
- Bei jährlichen Kosten (Aktivitäts- und Wartungskosten) von Tsd Euro 38,7 bzw. Tsd Euro 45,2 liegt die Amortisationszeit gegenüber der Fremdvergabe (Tsd Euro 260 bzw. Tsd Euro 520 p.a.) deutlich unter einem 1 Jahr – vorausgesetzt die Gesamtlänge der inspizierbaren Kanäle liegt über 260 km. Aber selbst im Falle von nur 65 km p.a. liegen die Inspektionskosten noch unter denen der konventionellen Alternative – eine Amortisation ist noch innerhalb der Lebensdauer möglich. Diese Kanallänge wird wahrscheinlich in jeder urbanisierten Region mit einer Fläche von mehr als 3 km² erreicht werden.¹⁹
- Vor diesem Hintergrund kann mit einer hohen Marktakzeptanz der Serviceroboter gerechnet werden. Aufgrund der Annahme, dass die momentan mit der Inspektion beauftragten Klein- und Kleinstbetriebe keine Möglichkeit haben, die für die Serviceroboter notwendigen Finanzmittel aufzubringen, kann man von der Serviceroboter-Einführung zunächst eine strukturelle Wirkung erwarten. Aufgrund der hohen Amortisationsrate könnte diese aber auch nur temporären Charakter haben, weil sich nach Bewährung des Serviceroboter-Einsatzes ggf. selbst für die Klein- und Kleinstbetriebe „neue“ Finanzierungsmöglichkeiten eröffnen könnten (die Wahrscheinlichkeit einer Fremdfinanzierung steigt bei „bewährten“ Technologien).

5.2 Forschungsbedarf

Autonome Kanalroboter können aus verfügbaren Automatisierungskomponenten aufgebaut werden. Für den wirtschaftlichen Betrieb sind jedoch noch einige Zusatzentwicklungen notwendig:

- Die Systemtechnik für Programmierung und Datenauswertung auf der Basis kommerzieller Katasterprogramme für Kanalwartung (zum Beispiel: www.ipsyscon.de), die über eine Schnittstelle für die Roboter verfügen.
- Kompakte Steuerungsalgorithmen für kleinskalige eingebettete Plattformen, die speicheroptimiert sind und an die Leistungsfähigkeit der Zielrechner angepasst sind.
- Adaptierte Speicher- und Komprimierungstechniken für große Bilddatenmengen auf leistungsschwachen Systemen.

¹⁹ Schätzung basierend auf der Annahme, dass jeder km² schachbrettartig alle 100 m von einem Kanal durchzogen wird. Diese würde zu einer Kanallänge von 20 km je km² führen (2 * 1 000 m / 100 m * 1 km)



01

02

03

04

05

06

07

08



09

10

11

KANALINSPEKTION

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Variante A (Inspektions- roboter)	SR-Variante B (autonomer Tender)
Steuermodul (Rechner)	3,7	1
Servoantriebe	5,3	1
Radialscanner	6,0	-
Kosten Integration und Montage (incl. Basisgerät und Standardausrüstung des vor- handenen Inspektionsgeräts)	97,3	50
Gewinnaufschlag des Herstel- lers/Ausrüsters 30%	33,7	16

Tab. 3-9.9 Anschaffungskosten (Tsd Euro)



SZENARIOSTECKBRIEF

MILCHVIEHWIRTSCHAFT



10



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Basierend auf der Empfehlung zweier Informationsgespräche zur Anwenderbranche „Landwirtschaft“, beschränkt sich dieser Steckbrief auf die Milchviehhaltung in mittleren und großen Unternehmen (mehr als 300 Kühe), da hier das größte Automatisierungspotenzial zu erwarten ist. Die Kernaufgabe in der Milchviehhaltung ist das Melken, welches in den betrachteten Betrieben zweimal täglich mit Hilfe eines Melkkarussells durchgeführt wird.

Existierende stationäre Melkroboter werden vor allem in kleineren Betrieben eingesetzt. Dies liegt darin begründet, dass sie als feste Stationen, welche selbstständig von den Kühen aufgesucht werden, einen geringeren Durchsatz an Kühen erlauben als z.B. Melkkarusselle. Jedoch existieren durchaus Betriebe, die 10 oder mehr Melkroboter parallel betreiben bei 1 000 – 2 000 Kühen, um einen höheren Durchsatz zu erzielen. Der Einsatz von Robotern ermöglicht den Betrieben eine Arbeitszeitreduktion und Arbeitszeitflexibilisierung sowie eine Steigerung der Milchqualität und Milchmenge. Des Weiteren kann auf die Einstellung von Arbeitern verzichtet werden, welche mit dem Melken nicht voll ausgelastet wären.

In größeren Betrieben werden vor allem Melkkarusselle eingesetzt, da sie einen höheren Durchsatz an Kühen im Vergleich zu Melkrobotern erlauben. Um ein Melkkarussell, das 1 800 Kühe bedient, durch Roboter zu ersetzen, wären ungefähr 20 stationäre Melkroboter nötig.

Melkkarussell und Melkroboter



Abb. 3-10.1 Dairymaster Melkkarussell (oben), stationärer DeLaval Melkroboter (unten)



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



Melkkarussell

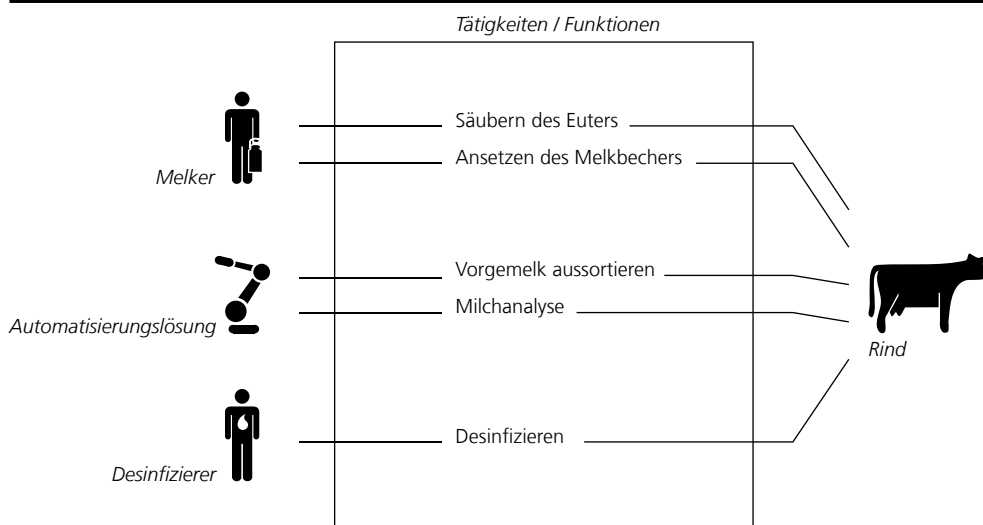


Abb. 3-10.2 Anwendungsfalldiagramm der IST-Situation

Sequenzdiagramm

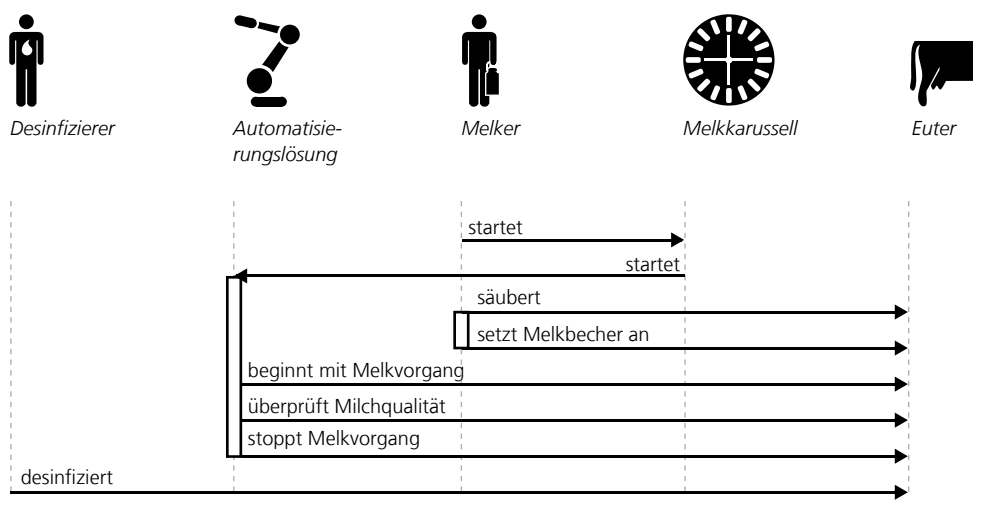


Abb. 3-10.3 Sequenzdiagramm der IST-Situation



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1.2 Probleme

Im Folgenden werden Probleme aktueller, stationärer Melkroboter beschrieben. Die angegebenen Zahlenwerte stammen von durchgeführten Anwender- und Herstellergesprächen im Bereich der Milchviehhaltung.

- Einsatz von existierenden Melkanlagen für größere Betriebe (mehr als 300 Kühe) sind oft nicht rentabel, da die Dauer eines Melkvorgangs mit ca. 1 – 3 Minuten pro Kuh einen zu geringen Durchsatz erlaubt.
- Einsatz von Melkern anstatt existierender Melkroboter ist in größeren Betrieben kostengünstiger, da diese mit der Aufgabe des Melkens voll ausgelastet werden können.
- Aktuelle, stationäre Melkroboter benötigen ca. 1 – 3 Minuten für einen Melkvorgang und können mit dem manuellen Ansetzen der Melkbecher am Melkkarussell mit einer Dauer von ungefähr 20 Sekunden pro Kuh kaum konkurrieren.
- Personalmangel durch schwierige Arbeitsbedingungen
 - Schichtbetrieb (Frühschicht und Nachtschicht)
 - Langfristige, zu erwartende Gelenkschädigung bei Melkern durch sich wiederholende Ansetzbewegung
 - Unangenehme Geruchsbelastung
- Beim Einsatz von Melkrobotern müssen säumige Tiere manuell in die Melkanlage getrieben werden.
- Strenge Hygienevorschriften wegen Seuchengefahr und Qualitätssicherung. Deshalb sind Maschinen den Menschen vorzuziehen.

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Der Einsatz eines mobilen Roboters mit Greifarm zum Greifen und Ansetzen des Melkbeckers am Melkkarussell könnte in einem größeren Betrieb mit ca. 1 800 Kühen jeweils 2 Melker im Zweischichtbetrieb ersetzen. Um eine ähnliche Lösung mit vorhandenen, stationären Melkrobotern zu erreichen, müssten ungefähr 20 einzelne Melkroboter installiert und betreut werden. Der zukünftige Melkroboter unterscheidet sich von den existierenden Lösungen dadurch, dass er nicht als eine stationäre Einheit von den Kühen einzeln aufgesucht wird, sondern zusammen mit einem Melkkarussell eingesetzt wird.

Durch die Positionierung des Roboters am Melkkarussell wird eine deutliche Steigerung des Durchsatzes im Vergleich zu existierenden, stationären Melkrobotern beabsichtigt.

1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Die Milchviehhaltung ist bestimmt durch folgende Merkmale:

- Hoher Preisdruck u.a. hervorgerufen durch einzuhaltende Milchquote. Der Gewinn pro Liter Milch liegt aktuell bei 2 – 4 Cent. Deshalb haben viele Betriebe ihr Angebot diversifiziert, um Marktschwankungen auszugleichen. Die Bereitschaft zur Automatisierung von Teilaufgaben ist hoch.
- Trotz existierenden Automatisierungslösungen, wie z.B. Melkkarussell, wird ca. 1 Mitarbeiter pro 30 – 50 Kühen benötigt.
- Die Lohnkosten pro Liter Milch betragen ungefähr 22%.
- Der Mangel an Melkpersonal wird sich verschärfen.
- Strenge Hygienevorschriften (z.B. Milch-Güteverordnung)

1.4.2 Einsatzbereich

Die Aufgabe des Melkens ist zeitgebunden und umfasst die folgenden Tätigkeiten:

- Reinigung der Zitzen mittels Bürsten (erforderliche Genauigkeit: ~0,5 cm)
- Melkbecher ansetzen (erforderliche Genauigkeit: ~0,5 cm)
- Automatisches Aussortieren des Vorgemelks
- Melken
- Milchanalyse
- Desinfektion der Zitzen (erforderliche Genauigkeit: ~0,5 cm)

Da das Karussell ständig in Bewegung ist, muss das Ansetzen des Melkbeckers schnell und sicher geschehen. Um ein Nachlassen der Milchleistung zu verhindern, muss unbedingt sichergestellt sein, dass alle Zitzen gemolken werden. Die Tiere dürfen keine Abneigung gegen das Melken entwickeln (z.B. durch unsachgemäßes Melken), da dies die Milchleistung der Kuh erheblich verringert.





01

02

03

04

05

06

07

08

09



10

11

MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Der Melkroboter ersetzt die Melker am Melkkarussell und übernimmt die folgenden Aufgaben:

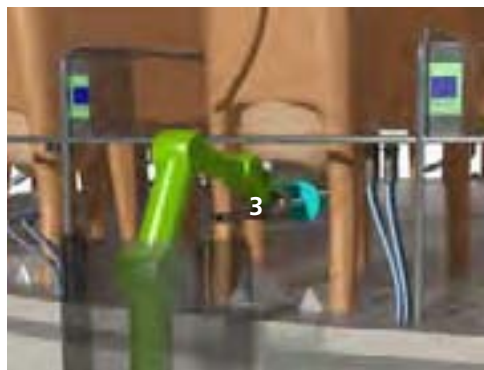
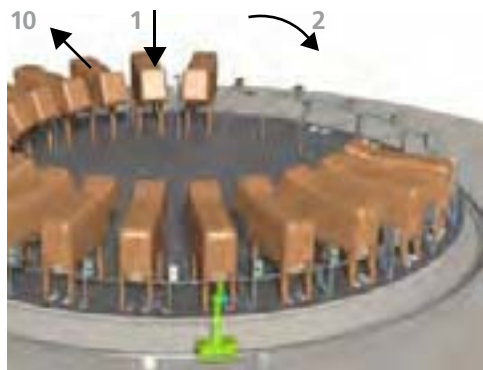
- Identifikation der Melkbecher
- Greifen der Melkbecher
- Identifikation der Zitzen
- Reinigung der Zitzen
- Ansetzen der Melkbecher

Das Absetzen des Melkbechers wird bereits durch eine entsprechende Automatisierungslösung am Melkkarussell erledigt.

2.2 Roboterentwurf

Der Roboter nimmt die Position der bisherigen Melker hinter dem Melkkarussell ein. Um die Melkbecher zu greifen und anzusetzen, besteht der Roboter aus einem Roboterarm mit mindestens 6 Freiheitsgraden und einem Zwei-Backen-Greifer. Um die Zitzen zu reinigen, befinden sich zusätzlich zwei Bürsten am Endeffektor des Roboterarms, die um ihre eigene Achse rotieren. Der Roboter ist auf einer mobilen Plattform montiert, die sich autonom synchron zum Karussell bewegen kann. Dadurch wird eine Arbeitsraumvergrößerung des Roboterarms erreicht, die notwendig ist, um ein sicheres Ansetzen des Melkbechers während des laufenden Betriebes des Melkkarussells zu ermöglichen.

Roboterentwurf



- 1 Kuh läuft vorwärts hinein
- 2 Rotation
- 3 Greifer zum Greifen aller 4 Melkbecher gleichzeitig
- 4 Bürsten zum Reinigen der Zitzen
- 5 Melkbecher
- 6 Kamera befindet sich am Arm
- 7 mobile Plattform
- 8 Schutz gegen Personenschäden z.B. Metallgitter
- 9 Roboterarm
- 10 Kuh läuft rückwärts heraus

Abb. 3-10.4 Mobiler Melkroboter am Melkkarussell (oben links), beim Greifen des Melkbechers (oben rechts), beim Säubern der Zitzen (unten links) und beim Ansetzen der Melkbecher (unten rechts).



01

02

03

04

05

06

07

08

09



10

11

MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Zur Identifikation des Melkbeckers und der Zitzen wird ein 3-D-Kamerasystem nach dem Time-of-Flight-Prinzip auf dem Roboterarm befestigt. Das Kamerasystem ist so frei beweglich und kann die zu erkennenden Objekte aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten.

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Im Rahmen des Axiomatic Design (Abb. 3-10.6 und 3-10.7) wird ein marktnahes System skizziert. Es werden überwiegend ausgereifte Sensoren eingesetzt, so dass die skizzierte Idee mit überschaubarem Forschungs- und Entwicklungsaufwand umgesetzt werden könnte. Im Rahmen der Variantenbildung wird eine Möglichkeit zur Reduzierung der Gesamtkosten skizziert.

Unkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, bereits relativ günstig, nur geringe Skaleneffekte zu erwarten):

- Mobile Plattform auf Schienensystem mit „Bumper“ zur Kollisionsvermeidung
- CCD-Farbkamera
- Roboterzelle zur Absicherung des Arbeitsraumes
- Backengreifer mit Formschluss
- Ummantelung von Roboterhardware zum Schutz vor Spritzwasser und Verschmutzung nach Schutzklasse IP66

Systemkritische Komponenten mit Produktstatus (etabliert, geringe Skaleneffekte zu erwarten, sehr teuer, Alternativen/Verbesserungen dringend nötig):

- 3-D-Kamera („Time-of-Flight“-Sensoren liefern 2,5-D-Daten mit Intensitätswerten in Echtzeit)
 - Aktives Messsystem (moduliertes Infrarotlicht)
 - Aktuelle Auflösung (176 x 144) geeignet zur 3-D-Objekterkennung
 - Kosten pro Einheit ~4 000 Euro (MESA SwissRanger 4000)
 - Derzeit keine Sicherheitszertifizierung; begrenzte Tiefenauflösung; Probleme bei schnellen Bewegungen
 - 6 DOF-Roboterarm, z.B. Universal Robots UR-6-85-5-A
- Systemkritische Komponenten ohne (Serien-)Produktstatus (Spezialanfertigungen, kein einheitlicher Produktionsprozess,

Skaleneffekte zu erwarten):

- Sensorhaut für Roboterarm
 - Berührungslose Kollisionsvermeidung durch kapazitive Sensoren
 - Kollisionen von Roboter und Kuh müssen unbedingt verhindert werden, da diese die Kuh verängstigen und so die Milchleistung sinkt
- Softwarekomponente Klassifikator zur Erkennung der Zitzen auf Basis von Time-of-Flight-Daten
 - Robuste Erkennung aller Zitzen unter „Stallbedingungen“
 - Derzeit existieren keine allgemeingültigen Klassifikatoren: je nach Anwendung müssen spezifische Merkmale zur Klassifikation entwickelt werden (z.B. Zitzenform)

TRL / € / FR-Diagramm



Abb. 3-10.5 TRL / € / FR-Diagramm für Sensorhaut



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

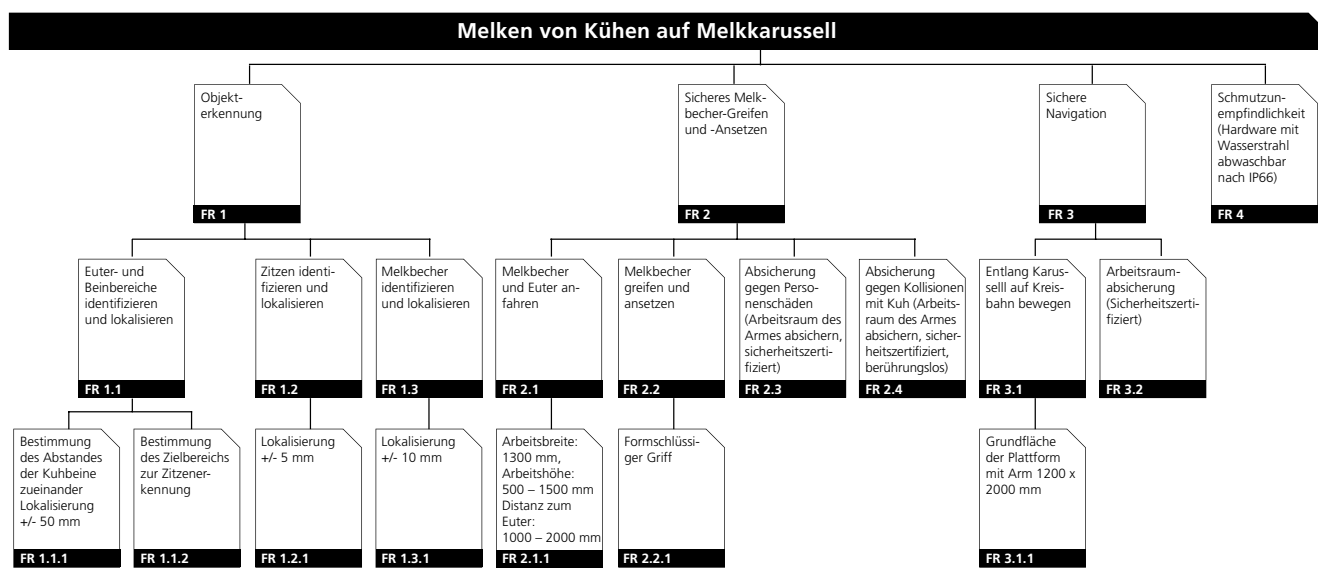


Abb. 3-10.6 Axiomatic Design – Functional Requirements

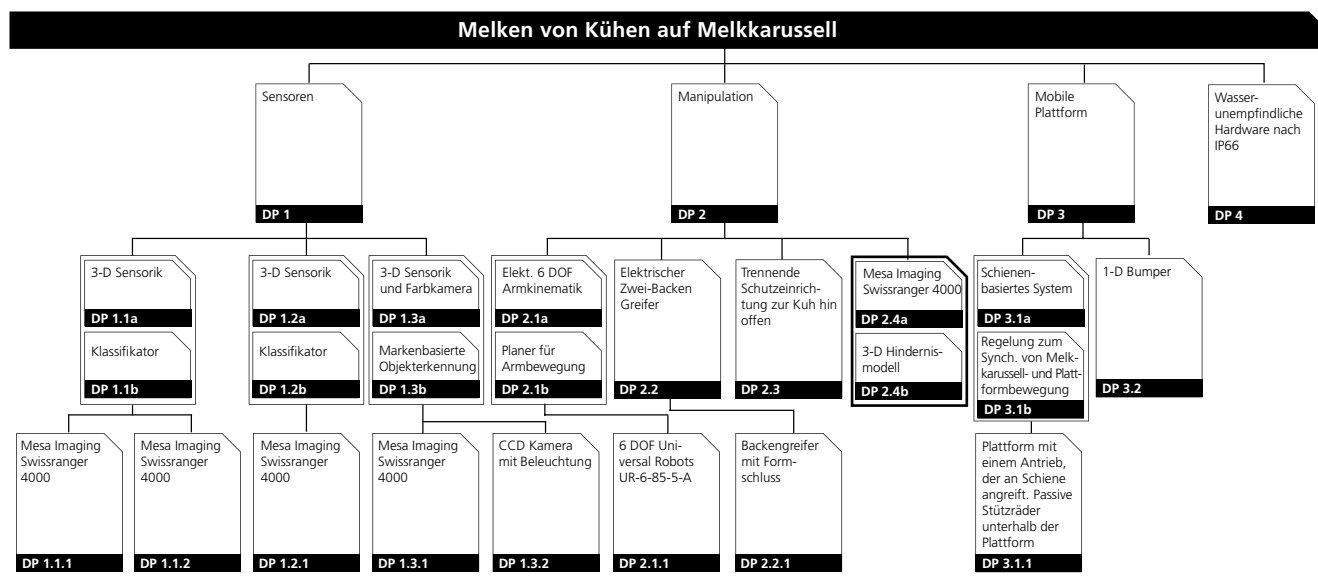


Abb. 3-10.7 Axiomatic Design – Design Parameters



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.2 Software

Basierend auf existierender Bildverarbeitungssoftware von stationären Melkrobotern muss ein Objekterkennungssystem entwickelt werden, das in der Lage ist, die Zitzen der Kuh sowie die Melkbecher zuverlässig zu erkennen. Dazu sind folgende Komponenten nötig:

- Markerbasierte Melkbechererkennung, z.B. markante Farbe des Melkbechers
- Initiales, semiautonomes Einlernen der Zitzenpositionen jeder einzelnen Kuh durch manuelles Markieren der Zitzen auf den Bilddaten
- Trainieren eines kuhspezifischen Klassifikators auf den markierten Zitzenpositionen zur Zitzenerkennung

Um die erkannten Zielpositionen von Melkbecher oder Zitze mit dem Roboterarm anzufahren, wird eine Armplanung benötigt. Dazu sind folgende Komponenten nötig:

- Berechnung von Bewegungstrajektorien
- Verhinderung von Kollisionen mit statischen Hindernissen
- Verhinderung von Kollisionen des Arms mit einer Kuh (dynamische Hindernisse)

Die Plattform kann sich auf einem Schienensystem sowohl frei als auch synchron zum Melkkarussell bewegen. Durch eine Koordination von Roboterarm und Plattform in Echtzeit ist es möglich, den Arbeitsraum des Roboters dem fahrenden Melkkarussell anzupassen. Dazu sind folgende Komponenten nötig:

- Steuerung für Plattform
- Koordination von Roboterarm und Plattform in Echtzeit

Zusätzlich wird noch ein Softwareframework zur Integration der Einzelkomponenten benötigt. Die Hauptfunktionen des Softwareframeworks umfassen:

- Kommunikation
- Gerätetreiber bereitstellen
- Diagnosesystem
- Robotermodell zur Trajektorienplanung

2.2.3 Varianten

Als Einschränkungen für den Markterfolg des Gesamtsystems erscheinen derzeit die Verfügbarkeit sowie die hohen Kosten der in Abb. 3-10.5 und 3-10.7 vorgeschlagenen Sensorhaut. In diesem Abschnitt wird eine SR-Variante skizziert, die ein Anfahren der erkannten Zitzenpositionen ohne die Verwendung einer Sensorhaut ermöglicht. Die sich daraus ergebenden Effekte auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung werden aufgezeigt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird das zugehörige „technology readiness level“ (TRL)-Diagramm der SR-Variante B dem Diagramm der Sensorhaut gegenübergestellt.

2.2.3.1 Komponente „Sensorhaut“

Um eine Umsetzung des Gesamtsystems mit bereits existierenden Hardwarekomponenten zu ermöglichen, werden zwei weitere Time-of-Flight-Sensoren zur Arbeitsraumüberwachung verwendet, die links und rechts vom Roboterarm angebracht sind. Diese übernehmen die Funktionalität der Sensorhaut, indem sie den sichtbaren Arbeitsraum des Roboterarms auf Kollisionen hin überwachen.

Zur Umsetzung der skizzierten SR-Variante B werden keine wesentlichen Veränderungen in Bezug auf die berechneten Softwarekosten bei Verwendung einer Sensorhaut erwartet. Bestehende Software aus dem Bereich der Servicerobotik verwendet bereits Daten von 3-D-Sensoren, um ein dynamisches Hindernismodell der Umgebung zu berechnen und einen Roboterarm sicher zu bewegen. Daher können zur Berechnung der Softwarekosten die Module dieser bereits existierenden Komponenten herangezogen werden.

Ein Nachteil der skizzierten SR-Variante B besteht darin, dass mit den Kameras nicht der komplette Arbeitsraum des Roboterarms erfasst werden kann und somit ein Restrisiko besteht, mit der Kuh beim Ansetzen des Melkbechers in Kontakt zu geraten.





MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

TRL/€/FR-Diagramm

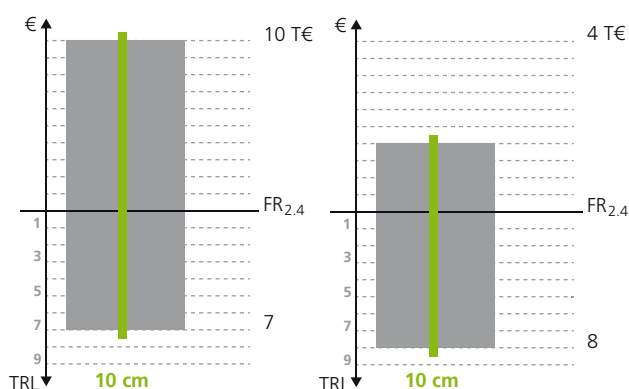


Abb. 3-10.8 TRL/€/FR-Diagramm für Sensorhaut mittels kapazitiver Sensoren (links) und eines 3-D Time-of-Flight Sensors (rechts)

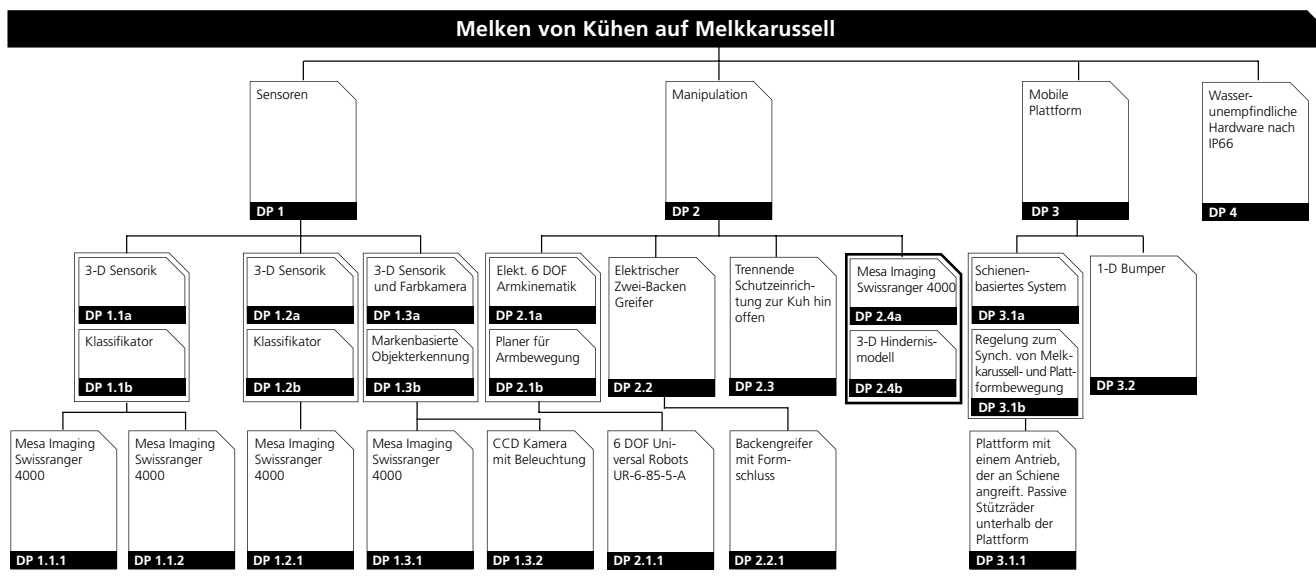


Abb. 3-10.9 Axiomatic Design – Design Parameters eines Melkroboters ohne Sensorhaut





01

02

03

04

05

06

07

08

09



10

11

MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.1 Euter- und Beinbereich identifizieren und lokalisieren	FR 1.1.1 Bestimmung des Abstandes der Kuhbeine zueinander Lokalisierung: +/- 50 mm FR 1.1.2 Bestimmung des Zielbereiches zur Zitzenerkennung	DP 1.1b Klassifikator		7	2	1. Robustheit der Klassifikation. Es müssen 100% der Zitzen erkannt werden unter „Stallbedingungen“. 2. Fehlklassifikationen müssen ausgeschlossen werden. 3. Keine existierenden allgemeingültigen Klassifikatoren: je nach Anwendung müssen spezifische Merkmale zur Klassifikation entwickelt werden
		DP 1.1.1 Mesa Imaging Swissranger 4000	4 000 €	9	2	Geringe Auflösung der Sensordaten (max. 200 x 200 px, Genauigkeit +/- 1 cm)
		DP 1.1.2 Mesa Imaging Swissranger 4 000	4 000 €	9	2	s. DP 1.1.1
FR 1.2 Zitzen identifizieren und lokalisieren	FR 1.2.1 Lokalisierung: +/- 5 mm	DP 1.2b Klassifikator		7	2	s. DP 1.1b
		DP 1.2.1 Mesa Imaging Swissranger 4 000	4 000 €	9	2	s. DP 1.1.1
FR 1.3.1 Melkbecher identifizieren und lokalisieren	FR 1.2.1 Lokalisierung: +/- 10 mm	DP 1.3b Markerbasierte Objekterkennung		9	1	Erkennung muss zuverlässig auch unter sich verändernden Lichtverhältnissen arbeiten
		DP 1.3.1 Mesa Imaging Swissranger 4 000	4 000 €	9	1	Geringe Auflösung der Sensordaten (max. 200 x 200 px, Genauigkeit +/- 1 cm)
		DP 1.3.2 CCD Kamera mit Beleuchtung	2 000 €	9	1	Keine
FR 2.1 Melkbecher und Euter anfahren	Planung der Armbewegungen in Echtzeit FR 2.1.1 Arbeitsbreite des Manipulators 1300 mm Arbeitshöhe 500 mm – 1 500 mm Distanz zum Euter 1000 – 2000 mm	DP 2.1b Planer für Armbewegung		9	2	Keine
		DP 2.1.1 6 DOF Universal Robots UR-6-85-5-A	17 000 €	8	2	Manipulator muss robust und nachgiebig gegen starke Stöße (Tritte der Kuh) sein
FR 2.2 Melkbecher greifen & ansetzen	FR 2.2.1 Formschlüssiger Griff	DP 2.2.1 Schunk Backengreifer mit Formschluss	5 000 €	9	2	Greifer muss robust gegen starke Stöße (Tritte der Kuh) sein
FR 2.3 Absicherung gegen Personenschäden	FR 2.3 Arbeitsraum des Armes absichern, sicherheitszertifiziert	DP 2.3 Trennende Schutzeinrichtung zur Kuh hin offen	500 €	9	2	



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 2.4 Absicherung gegen Kollisionen mit Kuh	Arbeitsraum des Armes absichern, sicherheitszertifiziert, berührungslos	DP 2.4 Sensorhaut auf Roboterarm	10 000 €	7	2	Derzeit keine geeignete industrielle Sensorhaut zur Integration auf dem Roboter für die dargestellte Applikation verfügbar. Aktuelle Probleme umfassen Skalierbarkeit sowie die Flexibilität und Dicke der Materialien, um biegsam zu sein und Bewegungen zu erlauben. Für die dargestellte Applikation ist eine besonders dünne Sensorhaut nötig, da der Roboter zwischen den Hinterbeinen der Kuh hindurchgeführt werden muss.
FR 3.1 Roboter entlang Karussell auf Kreisbahn bewegen	FR 3.1.1 Grundfläche der Plattform mit Arm 1200 mm x 2000 mm	DP 3.1.b Regelung synchron zu Melkkarussell- und Plattformbewegung		9	2	Keine
		DP 3.1.1 Plattform mit einem Antrieb, der an Schiene angreift	10 000 €	9	2	Keine
FR 3.2 Arbeitsraumabsicherung	FR 3.2 Sicherheitszertifiziert	DP 3.2 1-D Bumper	500 €	9	1	robust unter „Stallbedingungen“
FR 4 Schmutzunempfindlichkeit	Hardware mit Wasserstrahl abwaschbar nach IP66	DP 4 Wasserunempfindliche Hardware nach IP66	500 €	9	2	Keine

SR-Variante B

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 2.4 Absicherung gegen Kollisionen mit Kuh	Arbeitsraum des Armes absichern, sicherheitszertifiziert, berührungslos	DP 2.4a Mesa Imaging Swissranger 4 000	4 000 €	9	2	s. DP 1.1.1
		DP 2.4b 3-D Hindernismodell		8	2	In dem vorgestellten Szenario ist es der Kamera aufgrund von Verdeckungen nicht möglich, den kompletten Arbeitsraum des Manipulators zu überwachen

Tab.3-10.1 Komponentenübersicht



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

Kennzahlen	SR Variante A		SR Variante B		Manuelle Variante	
Grunddaten Use Case						
Lebensdauer (a)	8		8		-	
Anzahl Roboter (System)	2		2		-	
Eff. Produktivzeit (h/a)	4 380		4 380		5 548	
Personalstunden (h/a)	11 680		11 680		23 360	
Leistungseinheiten (LE/a)	876 000		876 000		1 109 600	
LCC-Summe (T€)	1 633,4	100%	1 626,1	100%	2 803,2	100%
Investition	117,0	7,2%	111,8	6,9%		
Installationskosten	9,6	0,6%	9,6	0,6%		
Aktivitätskosten	1 428,0	87,4%	1 428,0	87,8%	2 803,2	100%
Wartung/Instand.	78,8	4,8%	76,7	4,7%		
Andere	-	-	-	-		
DCF (@10%, T€)	-1131,4		-1124,8		-1 869,4	
Softwarekosten (T€)	4 438,6		4 458,6			
Leistungskosten (€/LE)	0,23		0,23		0,32	

Tab. 3-10.2 LCC

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Erläuterung zu Tabelle 3-10.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tabelle 3-10.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz des Systems ausgegangen (365 Tage). Das System wird in einem Zweischicht-Modell bei 8 h Schichtdauer eingesetzt – zum Betrieb sind in den SR-Varianten je Schicht zwei Personen notwendig (Zuführer/Desinfizierer; die beiden Melker entfallen). Die Verfügbarkeit des Roboters wird mit 75% angesetzt (technischer Ausfall), so dass die effektive Produktivzeit 4 380 h/a beträgt. Die nominale Melkleistung beträgt 200 Kühe/h.

Manuelle Alternative: In der manuellen Alternative wird bei gleicher nomineller Melkleistung eine Verfügbarkeit von 95% angesetzt, so dass sich die effektive Produktivzeit

entsprechend erhöht. Weiterhin sind zusätzlich zwei weitere Personen (Melker) im Einsatz, so dass insgesamt vier Personen pro Schicht benötigt werden.

Investition: Relevant für den Vergleich der Lebenszykluskosten über die verschiedenen Alternativen sind hier nur die zusätzlichen Kosten für die Roboter – die sonstige Peripherie/Infrastruktur ist über alle Alternativen gleich (Melkkarussell). Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (45,0 Tsd Euro pro Roboter) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

Manuelle Alternative: Keine zusätzliche Investition notwendig.

Installationskosten: Sowohl für die Planung und (Erst-) Einrichtung des Roboters bzw. Schulung wird jeweils ein externer Personalaufwand von 9 PT (72 Ph) bzw. 3 PT (24 Ph) angesetzt (100 Euro/Ph). Diese Aufgabe wird durch den Systemintegrator übernommen.

Manuelle Alternative: Keine Aufwände.

Aktivitätskosten: Die Personalkosten werden mit 15 Euro/h angesetzt (gering qualifiziertes Personal; Mindestlohn von



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

10 Euro/h + 50% Personalnebenkosten). Der Energieverbrauch pro Roboter beträgt 1,0 kW pro Roboter während der Produktivzeit (8 760,0 kWh/a) – die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt. Weitere Betreuungskosten: Die Anlage erfordert in jeder Schicht eine technische Betreuung (Sichtprüfung der Roboter etc.; ca. 5 Minuten/Schicht). Dafür werden Personalkosten in Höhe von 34 Euro/h verrechnet (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten).

Manuelle Alternative: Keine Änderung.

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 h) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von 100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten werden auf 5% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

Manuelle Alternative: Keine zusätzlichen/anderen Aufwände.

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik (s. *Kapitel 2.3.1.2*) Abschätzung von Softwareentwicklungskosten) 4 439 Tsd Euro für SR-Variante A bzw. 4 459 Tsd Euro für die SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

Beim Serviceroboter-Anwendungsfall handelt es sich um 100%ige Automatisierungslösung im Vergleich zur manuellen Alternative, bei der die menschliche Arbeitsleistung der Melker während der Produktivzeit des Systems vollständig substituiert wird. Es wird davon ausgegangen, dass das System vollausgelastet ist.

Kostenstruktur: Auch im Serviceroboter-Szenario dominieren die Aktivitätskosten mit mehr als 80% den Großteil der Lebenszykluskosten, was fast ausschließlich auf die Lohnkosten der verbliebenen Arbeitskräfte zurückzuführen ist (zwar wurden die Melker ersetzt, es werden aber immer noch ein Zuführer und ein Desinfizierer benötigt).

Wirtschaftlichkeit: Die Serviceroboter-Alternative ist gegenüber der konventionellen Durchführung deutlich günstiger – sowohl im Rahmen der (relevanten) Prozesskosten:

0,23 Euro/LE vs. 0,32 Euro/LE als auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF (-1131,4 vs. -1 869 Tsd Euro)¹. Bzgl. der laufenden Kosten führt die Serviceroboter-Variante im Vergleich zur manuellen Alternative zu einer Ersparnis von 706,25 Tsd Euro, so dass bei 8 Jahren Lebensdauer eine Amortisation der Investition innerhalb von zwei Jahren möglich ist.²

Sensitivität: Auf Grund der Kostenstruktur kommen als einzig relevante Parameter für eine Sensitivitätsanalyse die „Verfügbarkeit“ des Systems sowie das Schichtmodell in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Szenarien gleichmäßig oder sind im Vergleich zu dem Gewicht der Aktivitätskosten irrelevant). In diesem Sinne erscheint das Ergebnis robust, da es sich selbst

- im Falle einer Verfügbarkeit von 60% im Vergleich zur manuellen Alternative rechnet (0,29 Euro/LE)
- im Falle eines Ein-Schichtbetriebs bzw. in einem verkürzten Zwei-Schichtbetrieb³ zu je 4 Stunden im Vergleich zur manuellen Alternative rechnet (0,26 bzw. 0,28 Euro/LE)

3.2 Nutzwert

- Verminderung der Seuchengefahr und garantierte Einhaltung der Hygienevorschriften durch das Ersetzen der menschlichen Arbeitskraft am Tier durch den Roboter.
- Der Einsatz eines Melkroboters ermöglicht, häufiger zu melken und damit die Milchleistung der Kühe zu steigern.

¹ Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseite“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

² Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante A = $0,75/0,95 * 2.803,2 - (1.428,0 + 78,8) = 706,25$ >> $(117 + 9,6)$. Amortisationsdauer = $(117 + 9,6) / 706,25 * 8$. Die Amortisationsrechnung bedingt eine Angleichung des Leistungsvolumens aller zu vergleichenden Alternativen. Daher müssen die Kosten der manuellen Alternative entsprechend der geringeren Leistungsmenge der SR-Variante angepasst werden (es fallen nur Aktivitätskosten an – diese verhalten sich proportional zur Leistungsmenge; 75% / 100%).

³ Ein Ein-Schichtbetrieb wird aus praktischen Gründen faktisch nicht möglich sein, da die Kühe morgens wie abends gemolken werden müssen.





MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Land- und Viehwirtschaft“

2007 betrug die Bruttowertschöpfung in der Landwirtschaft 16,0 Mrd Euro (Produktionswert 46,3 Mrd Euro; Vorleistungen 30,3 Mrd Euro).⁴ Dabei bewirtschafteten 370,5 Tsd. Betriebe rund 17 Mio Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche und beschäftigten 1,251 Mio Arbeitskräfte (davon 336,3 Tsd. Saisonarbeitskräfte) – die tatsächliche Arbeitsleistung entsprach 529,7 Tsd. Vollzeitäquivalenten. Etwa 95% der landwirtschaftlichen Betriebe sind Familienbetriebe – sie bewirtschaften aber weniger als ein Viertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche. 55% der Betriebe übt landwirtschaftliche Tätigkeiten nur im Nebenerwerb aus. Die dominierende Rechtsform der Betriebe ist das Einzelunternehmen mit einem Anteil von 93,5%, gefolgt von Personengesellschaften (5,1%) und juristischen Personen (1,4%). Bezogen auf die bewirtschafteten Flächen bewirtschaften juristische Personen 561,6 Hektar, Personengesellschaften 125,7 Hektar und Einzelunternehmen 33,1 Hektar.

4 Die folgenden Ausführungen basieren, soweit nicht anders erwähnt, auf aktuellen Daten des statistischen Bundesamtes (Stand Oktober 2010, www.destatis.de) sowie: Statistisches Bundesamt (2009): Landwirtschaft in Deutschland und der Europäischen Union 2009 (<https://www-ec.destatis.de/csp/shop/fgl/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,Warenkorb.cs&action=basketadd&id=1024185>)

	Einheit	1999	2003	2005	2007
Deutschland					
Betriebe	1 000	461,9	412,3	389,9	370,5
Landwirtschaftlich genutzte Fläche insgesamt	1 000 ha	17 119,2	16 981,8	17 035,2	16 931,9
Landwirtschaftlich genutzte Fläche je Betrieb	ha	37,1	41,2	43,7	45,7
Arbeitskräfte insgesamt	1 000	1 437,0	1 303,3	1 276,4	1 251,4
davon					
Familienarbeitskräfte	1 000	940,8	822,7	782,7	728,6
Ständig beschäftigte familienfremde Arbeitskräfte	1 000	195,9	191,4	187,4	186,6
Nicht ständig beschäftigte familienfremde Arbeitskräfte	1 000	300,3	289,2	306,3	336,3
Betriebliche Arbeitsleistung insgesamt	1 000 AK-E*	612,3	588,3	559,1	529,7
Betriebliche Arbeitsleistung je 100 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche	AK-E* je 100 ha	3,6	3,5	3,3	3,1

* Arbeitskraft-Einheit

Tab. 3-10.3 Ausgewählte Strukturdaten (Statistisches Bundesamt 2009)⁵

Die betrieblichen Strukturen in der Landwirtschaft unterliegen einem fortlaufenden Wandel, dessen Haupttreiber nicht nur der technische und züchterische Fortschritt, sondern auch der zunehmende Wettbewerb, die demografische Entwicklung sowie die Agrarpolitik sind. Kennzeichnende Merkmale dieses Wandels sind neben der weiterhin stark abnehmenden

5 Bei den Daten in dieser Tabelle handelt es sich um repräsentative Ergebnisse des statistischen Bundesamtes, die daher von denen der Totalerhebung – ebenfalls vom Statistischen Bundesamt – abweichen können. Statistisches Bundesamt (2009)



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 4 MARKTDATEN

Anzahl der Betriebe (1999: 461,9 Tsd. Betriebe) insbesondere folgende Faktoren:

- Die weiterhin zunehmende Produktivität,
- der daraus resultierende, abnehmende Arbeitseinsatz (relativ und absolut) sowie
- die zunehmende Flächen- und Betriebsgrößenkonzentration.

Der betriebliche Arbeitseinsatz ist gegenüber 1999 um 14% gesunken (vgl. Tab. 3-10.3) – gleichzeitig bewirtschaften die Betriebe trotz insgesamt zurückgehender Nutzflächen und Betriebszahlen im Durchschnitt fast 25% mehr Fläche. Diese hohen Produktivitätsfortschritte werden jedoch bei weitem nicht von allen Unternehmen erreicht. Nach aktuellen Zahlen des Statistischen Bundesamts zur Landwirtschaft in Deutschland wird die aktuelle „Wachstumsschwelle“ der Betriebe in dieser Hinsicht auf mindestens 75 Hektar geschätzt. Diese Größe erreichen jedoch nur etwa 13% der Betriebe, so dass damit zu rechnen ist, dass die Größenkonzentration der Betriebe auch in Deutschland weiter zunehmen wird. Schon heute bewirtschaften sie fast 62% der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Hinsichtlich der Rechtsform ist festzustellen, dass gerade Personengesellschaften in der Vergangenheit ihre durchschnittlich bewirtschafteten Flächen vergrößert haben (+26% gegenüber 1999), während Kapitalgesellschaften und Genossenschaften einen Verlust zu verzeichnen hatten (-2% gegenüber 1999).

Lage:

Das allgemeine Stimmungsbild in der Landwirtschaft hat sich stark verschlechtert. Die aktuelle wirtschaftliche Situation bewerten die Landwirte im Durchschnitt mit der Schulnote 3,73.⁶ Hinsichtlich der betrieblichen Ertragslage verzeichneten die Haupterwerbsbetriebe nach zuletzt sehr dynamischen Steigerungen im Berichtsjahr 2008/2009 einen Gewinnrückgang von fast 23% – wobei sich die landwirtschaftlichen Haupterwerbszweige sowohl in ihrer Dynamik wie Tendenz

durchaus erheblich voneinander unterscheiden: So ist der Gewinnrückgang mit -45,5% in der Milchviehwirtschaft deutlich stärker als im Ackerbau (-12,9%), während der Bereich Veredlung einen Anstieg von +242% verzeichnen konnte.⁷ Insgesamt ist die Landwirtschaft weiterhin ein in seiner wirtschaftlichen Entwicklung zwar dynamischer, aber auch sehr unstabiler Markt.

Investitionsverhalten:

Die beschriebenen Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft konnten nur durch den vermehrten Technologieeinsatz erreicht werden – entsprechend stark ist die Kapitalintensität in der Landwirtschaft (Bruttoanlageinvestitionen 2008: 8 918 Mio Euro – davon 5 150 Mio Euro in Ausrüstungen).⁸ Mit 284 000 Euro Kapital je Erwerbstätigem gehört die Landwirtschaft zu den kapitalintensivsten Branchen der deutschen Wirtschaft.⁹ Die verfügbaren Finanzmittel werden nach aktuellen Daten des BMELV mit 117,4 Tsd Euro je Unternehmen angegeben – davon bleiben nach Abzug der Entnahmen durchschnittlich 32,9 Tsd Euro für Investitionen übrig.¹⁰

Aufgrund des engen finanzwirtschaftlichen Rahmens wird die Entscheidungsfindung in allen größeren landwirtschaftlichen Unternehmen systematisch und aus einem betriebswirtschaftlichen Kalkül heraus erfolgen.¹¹ Bezüglich der Investition in neue Technologien hat man festgestellt, dass diese auch in der Landwirtschaft nicht nur von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Betriebs, sondern auch von anderen,

⁷ BMELV (2009): Buchführungsergebnisse Landwirtschaft. Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe 2008/2009 (<http://www.bmelv-statistik.de>)

⁸ BMELV (2010): Statistisches Jahrbuch (<http://www.bmelv-statistik.de/de/statistisches-jahrbuch/kap-c-landwirtschaft>)

⁹ Deutscher Bauernverband (2010): Situationsbericht 2010 (www.situations-bericht.de)

¹⁰ BMELV (2009): Buchführungsergebnisse Landwirtschaft. Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe 2008/2009 (<http://www.bmelv-statistik.de>)

¹¹ U.a. auch bestätigt durch die in dieser Studie befragten Experten.

⁶ Deutscher Bauernverband (2010): Situationsbericht 2010 (www.situations-bericht.de)



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 4 MARKTDATEN

qualitativen Faktoren abhängen – insbesondere dem Ausbildungsniveau und dem Alter der Entscheider.^{12, 13} Zusammenfassend lassen sich aus den obigen Darstellungen folgende Aussagen zum Investitionsverhalten in der Land- und Viehwirtschaft ableiten:

- Wirtschaftlicher Erfolg hängt von einem zunehmenden Kapitaleinsatz in den Betrieben ab.
- Die dafür notwendigen Finanzmittel werden nur große bis sehr große Unternehmen aufbringen können.
- Aufgrund der begrenzten Finanzierungsmittel und der oftmals nicht stabilen Marktentwicklung werden insbesondere finanzwirtschaftliche Kennzahlen wie Cashflow und Gewinn die Investitionsentscheidung der Landwirte beeinflussen.
- Dabei ist davon auszugehen, dass die für die zur Beurteilung der Investitionsentscheidung notwendigen betriebswirtschaftlichen Kenntnisse in den relevanten Betrieben vorhanden sind und zur Anwendung kommen.
- Qualitative Faktoren spielen zwar eine Rolle, werden jedoch erst relevant, wenn die absolute Wirtschaftlichkeit der Investition sichergestellt ist.

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Milchviehwirtschaft“

Tab. 3-10.4 ergänzt die obigen Marktstrukturdaten spezifisch mit Daten aus dem Bereich Milchviehwirtschaft.

Aus einer Untersuchung des Investitionsverhaltens von bayrischen Milchviehbetrieben geht hervor, dass die Investition in hohem Maße von Erfolgskennzahlen bestimmt wird.¹⁴

Der Cashflow hat einen positiven Einfluss sowohl auf die Investitionsentscheidung als auch auf die Höhe der Investi-

tionsausgaben. Es kann festgestellt werden, dass je mehr Geld der Betrieb zur Verfügung hat, desto mehr investiert er. Investitionszulagen und -zuschüsse wirken sich ebenfalls positiv auf Investitionen aus. Für Milchviehbetriebe im Alpenraum kann zusätzlich eine erhöhte Investitionsfreudigkeit in Maschinen und Geräte festgestellt werden.

Investition in ein automatisches Melkverfahren (AMV) ist mit hohen Kosten verbunden und bewirkt einen Einkommensverlust für die Landwirte.¹⁵ Bei den zugrunde gelegten Kriterien wie „Zahlungsbereitschaft“ und „Nutzungskosten“ sind nur 5,1% (entspricht 2 960 Betrieben) der betrachteten Betriebe an einem AMV interessiert.¹⁶ Aufgrund der geringen Zahl der potenziellen AMV-Anwenderbetriebe in Deutschland ist mittelfristig keine bedeutende Strukturwirkung aufgrund des AMV-Einsatzes zu erwarten.

Betriebe (Anzahl) und Tiere (in Tsd.)	101 202 / 4 071,2
davon < 100 Tiere	96 009 / 2 948,2
davon 100 – 499	4 846 / 833,0
davon > 500 Tiere	347 / 290,1
Betriebe im Haupterwerb*	59 947 / 2 529,8
Beschäftigte in Haupterwerbsbetrieben**	95 915,2
Produktionswert (Mio €; Milch)	7 125

* BMELV (2009)

** Vollzeitäquivalente. BMELV (2009)

Tab. 3-10.4 Strukturdaten Milchviehwirtschaft¹⁷

12 Liao, B.; Martin, P. (2009): *Farm innovation in the broadacre and dairy industries, 2006-07 to 2007-08*. Australian Bureau of Agriculture and Resource Economics (ABARE).

13 Diederer, P. et al. (2003): *Innovation Adoption in agriculture: innovators, adopters and laggards*. Cahiers d'économie et sociologie rurales, Nr. 67.

14 Im Folgenden Läßle, D. et al. (2007): *Investitionsverhalten in der Landwirtschaft – eine empirische Untersuchung bayerischer Betriebe*. Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie, Nr. 01.

15 Im Folgenden Hein (2001): *Strukturwandel und technischer Fortschritt in der Landwirtschaft – Eine Analyse der Diffusion automatischer Melkverfahren in Deutschland*. Universität Hohenheim.

16 Betriebe im Haupterwerb

17 Statistisches Bundesamt (2008): *Agrarstrukturerhebung 2007 (Fachserie 3 Reihe 2.1.3.)*



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 4 MARKTDATEN

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Bis auf die Arbeit von Läßle et al. (2007) ist den Autoren keine weitere Studie bekannt, die sich ausführlich mit dem Investitionsverhalten im Bereich der Milchviehwirtschaft und speziell mit Investition in AMV beschäftigt hat. Da der hier betrachtete Anwendungsfall von Servicerobotern einen Spezialfall im Bereich der AMV darstellt (groß-technische AMV mit Melkkarussell) deckt die dort genannte Zahl von 2 960 potenziellen Anwenderbetrieben einen weitaus größeren Markt als den für dieses Anwendungsszenario relevanten Teil davon ab. Aus diesem Grund wird auf Basis der Daten des statistischen Bundesamts der hier relevante Teilmarkt wie folgt abgegrenzt (vgl. Tab. 3-10.5):

- Statistisch relevanter Sektor ist die „Landwirtschaft“
- Nur Betriebe mit Milchvieh
- Nur Betriebe mit mehr als 500 Milchkühen. Da sich der Einsatz eines Melkkarussells im manuellen Betrieb in der Regel sogar erst ab sehr viel mehr als 500 Milchkühen lohnt, wird hier ein weiterer Abschlag vorgenommen (eigene Schätzung)
- Nur Betriebe im Haupterwerb (hier wird aufgrund der Viehzahl von einem 100% Anteil ausgegangen).

Landwirtschaftliche Betriebe insgesamt	374 514
davon Viehwirtschaft	268 781
davon Milchkühe	101 202
davon im Zielmarkt (Haupterwerb, Milchkuhbestand > 500)	347
davon relevant für Marktpotenzial (Schätzung)	~250

Tab. 3-10.5 Ableitung des relevanten Zielmarkts¹⁸

18 Statistisches Bundesamt (2008): Agrarstrukturhebung 2007 (Fachserie 3 Reihe 2.1.3.).

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt werden demnach 250 Betriebe als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Anwendungsszenario angenommen. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-10.5):

- Da die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme – welche hier als Ausgangsbasis für die Abschätzung des Marktpotenzials dient – nicht direkt verfügbar ist, ist sie auf Basis der vorhandenen statistischen Werte wie folgt abzuschätzen. Aus einer detaillierten Erhebung des BMELV geht hervor, dass jedem Haupterwerbsbetrieb in der Milchviehwirtschaft 2008/2009 durchschnittlich etwa 32,4 Tsd Euro an Finanzmitteln für Investitionen zur Verfügung standen.¹⁹ Da es sich dabei um einen Durchschnittswert unabhängig von der Unternehmensgröße handelt, kann dieser so nicht auf die hier relevanten Großbetriebe übertragen werden, sondern muss entsprechend angepasst werden – dies soll hier auf Grundlage der durchschnittlichen Investitionen pro Tier erfolgen. Insgesamt investierten die Haupterwerbsbetriebe eine Summe von 1 942 282,8 Tsd Euro, was bei einem Viehbestand von 2 529 763 Tieren zu einer Investition von durchschnittlich 767,7 Euro pro Tier führt.²⁰ Für die Betriebe mit mehr als 500 Tieren ergibt sich ein durchschnittlicher Viehbestand von 836²¹. Auf dieser Grundlage wird geschätzt, dass jedem Großbetrieb im Schnitt 641,8 Tsd Euro für Investitionen zur Verfügung standen (im Gegensatz zu den 32,4 Tsd Euro über alle Betriebe).
- Auf dieser Grundlage ergibt sich für die hier relevanten 250 Betriebe eine Bruttoinvestitionssumme von 160 449,3 Tsd Euro – davon entfallen ca. 68 993,2 Tsd Euro auf Maschinen und Anlagen.²²

19 BMELV (2009).

20 Datengrundlage BMELV (2009): 59 947 relevante Betriebe; 32,4 Tsd Euro pro Betrieb an Investitionen; 42,2 Tiere pro Betrieb.

21 Vgl. Tab. 3-10.4

22 Schätzung anhand der Quote von Maschinen- und Anlagevermögen zu gesamten Anlagevermögen je Haupterwerbsbetrieb (2007: ca. 43%). BMELV (2009).





01

02

03

04

05

06

07

08

09



10

11

MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 4 MARKTDATEN

- Einer Expertenschätzung zufolge könnten davon wiederum 40% auf Serviceroboter entfallen,²³ so dass das hier relevante Marktpotenzial auf insgesamt 27 597,3 Tsd Euro abgeschätzt wird.
- Zu beachten ist, dass jedes Serviceroboter-System im Grunde 2 Serviceroboter beinhaltet. Bei einem Systempreis von 117 Tsd Euro könnte dies rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von ca. 472 Servicerobotern (236 Serviceroboter-Systeme) führen – was letztlich zu einer Installed Base von 3 776 / 1 888 Serviceroboter-Systemen im „eingeschwungenen“ Marktzustand führen würde (Lebensdauer 8 Jahre). Für SR-Variante B ergeben sich bei einem Systempreis von 111,8 Tsd Euro Werte von ~494 Servicerobotern (247 Serviceroboter-Systemen) pro Jahr bzw. 3 952 Serviceroboter (1 976 Serviceroboter-Systeme) als Installed Base. Da jeder Betrieb in der Regel aber nur ein Serviceroboter-System benötigt, wird letztlich mit einem durchschnittlichen Absatzpotenzial von ~31 Serviceroboter-Systemen (62 Servicerobotern) pro Jahr gerechnet.²⁴

Auf Grund der positiven LCC-Betrachtung (vgl. Abschnitt 3.1) sind keine weiteren Abschlüsse auf das errechnete Marktpotenzial vorzunehmen.

Relevante Betriebe	~250
Brutto Investitionssumme (T€)	~160 449,3
davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~68 993,2
davon SR Potenzial (T€)	~27 597,3
Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR Systempreis T€ 117/111; 2 SR pro System)	
Errechnet	~472/494
real (1 SR System pro Betrieb)	~62
Errechner max. Bestand an SR (8 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
errechnet	~3 776 / 3 952
real (1 SR System pro Betrieb)	~500

Tab. 3-10.6 Ableitung des Marktpotenzials (Eigene Schätzungen)

²³ Investitionsanteil aus dem Interview mit Dr. Wendl von der Bayer Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

²⁴ Unter der Annahme einer gleichmäßigen Marktdurchdringung; berechnet als maximale Installed Base zu Lebensdauer (250 Systeme/8 Jahre).



MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Der hier betrachtete Anwendungsfall ist zwar nur für eine kleine Anzahl von Betrieben relevant (~ 250 Betriebe) – für diese erscheint er jedoch in jeder Hinsicht wirtschaftlich im Vergleich zur konventionellen Lösung.
- Auch die zu erwartende Amortisation der Serviceroboter-Investition liegt deutlich unter 2 Jahren.
- Aufgrund der hohen Rationalisierungsbedarfe in der Landwirtschaft sowie der Robustheit der LCC-Berechnung kann mit einer großen Akzeptanz im Zielmarkt gerechnet werden. Interessant ist, dass es sich selbst in einem verkürzten Zwei-Schicht-Betrieb rechnen würde.
- Vor diesem Hintergrund kann mit einer hohen Marktakzeptanz der Serviceroboter-Lösungen gerechnet werden. Da die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit alleine auf der Einsparung von zwei Melkern im Zwei-Schicht-Betrieb erreicht wird, sollte berücksichtigt werden, dass dies je nach regionaler Arbeitskräfte-Verfügbarkeit entweder zu einer Entspannung des Arbeitskräfte-Mangels oder einer weiteren Verschärfung der Arbeitslosigkeit im Niedriglohnssektor führen kann.

5.2 Forschungsbedarf

Entwicklung von Bildverarbeitungs-komponenten zur sicheren Identifikation von Objekten, die in ihrer Gestalt nur ungenau spezifiziert werden können, wie z.B. Kuhzitzen

- Keine allgemeingültigen Merkmale zur Lösung von Klassifikationsproblemen vorhanden. Derzeitige Ansätze benötigen immer eine manuelle Entwicklung von applikationsspezifischen Merkmalen (z.B. 3-D-Merkmale wie Oberflächennormalen oder 2-D-Merkmale basierend auf Gradientenrichtungen von Intensitätsverläufen) als Basis zur Lösung des Klassifikationsproblems, um eine fast 100% Erkennungsrate zu erreichen und Fehlklassifikationen auszuschließen. Die Entwicklung eines Tools zum automatischen Extrahieren von geeigneten Merkmalen würde den Entwurf und Einsatz von Bildverarbeitungs-komponenten wesentlich vereinfachen und eine deutliche Reduktion der Entwicklungskosten bewirken.

Entwicklung leistungsstärkerer 3-D-Sensoren in Bezug auf Messgenauigkeit und Auflösung

- Derzeitige 3-D-Sensorik basierend auf der Time-of-Flight Technologie hat den Nachteil, dass die Tiefendaten noch stark rauschbehaftet sind und im Allgemeinen nur eine Messung mit einer Genauigkeit von ungefähr ± 1 cm erlauben. Auch die räumliche Auflösung von derzeit maximal 204 x 204 Pixeln ist limitiert. Um die Auflösung zu erhöhen, kann die Time-of-Flight Sensorik mit einem Stereo-Kamerasystem gekoppelt werden, um die Vorteile beider Systeme zu vereinen. So erhält man ein möglichst dichtes und genaues Tiefenbild mit Farbinformationen. Jedoch ist zur Kopplung der beiden Sensorsysteme ein erhöhter Rechen- und Hardwareaufwand nötig, welcher einen Betrieb des Systems in Echtzeit (~30 fps) meistens verhindert. Wünschenswert wäre die Entwicklung leistungsstärkerer Time-of-Flight Sensorik mit einer Auflösung im Megapixel-Bereich, welche sowohl Tiefen- als auch Farbinformationen von einer Szene in Echtzeit liefert und damit die Integration eines zusätzlichen Kamerasystems unnötig macht.

Entwicklung taktile Sensorhaut für Roboterarme zum sicheren Gebrauch des Roboterarms

- Die Entwicklung einer taktilen Sensorhaut für Roboterarme befindet sich derzeit noch im Prototypenstatus. Die größten Herausforderungen für die Forschung ergeben sich aus der gewünschten Skalierbarkeit der Lösung sowie der nötigen hohen Flexibilität der verwendeten Materialien.





MILCHVIEHWIRTSCHAFT

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten	SR-Var. A	SR-Var. B
Mobile Plattform	7 000 €	7 000 €
MESA Swissranger 4 000	4 000 €	12 000 €
CCD Kamera	2 000 €	2 000 €
Backengreifer mit Formschluss	5 000 €	5 000 €
6 DOF Roboterarm Universal Robots UR-6-85-5-A	17 000 €	17 000 €
Sensorhaut für Manipulator	10 000 €	entfällt

Tab. 3-10.7 Anschaffungskosten eines Melkroboters am Melkkarussell

SZENARIOSTECKBRIEF

PRODUKTIONSASSISTENZ



11



1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES



2 SYSTEMKONZEPTE

3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE:
SERVICEROBOTERLÖSUNG VERSUS STATUS QUO

4 MARKTDATEN



5 FAZIT



6 ANHANG



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

1 Kurzbeschreibung des Anwendungsfalles

1.1 Derzeitige Form der Aufgabendurchführung

Der aktuelle Ist-Zustand der Robotik bei Automobilherstellern umfasst den großflächigen Einsatz von Industrierobotern im Karosserierohbau sowie den vergleichsweise selteneren Einsatz von Industrierobotern in der Montage. Als Beispiel für bestehende Mensch-Roboter-Kooperationen seien Roboter zum Cockpiteinbau genannt. Diese werden ohne Schutzzäune über einen Joystick gesteuert, werden kurz vor dem Fügepunkt „weich“ geschaltet und nutzen dann die Feinmotorik des Bedieners. Dieser passt das Cockpit über seine Hand-Auge-Koordination entlang eines weichgeschalteten Korridors in das Fahrzeug ein. Der Roboter wird hier als Hebezeug verwendet, die Kraft und Präzision der Grobpositionierung bringt der Roboter auf, die Flexibilität und Feinpositionierung erfolgt durch den Bediener. Weiterhin sind in der Automobilindustrie Robotersysteme im Einsatz, die auf einem Luftkissen gleiten und sich so am Montageband im Fließprozess mitbewegen, um im Montageprozess mitarbeiten zu können. Die einzigen Servicerobotik-Systeme, die momentan hier zum Einsatz kommen, sind Leichtbauroboterarme, die zur Hinterachsmontage verwendet werden. Dies geschieht umgeben von einem Schutzzaun und ohne Veränderung der Aufgabe oder der Position der Roboterarme.

Abgesehen von diesem singulären, stationären Roboter-Einsatz wird die Montage von Fahrzeugen in den meisten Fällen am Fließband durch Werkerteams im Schichtbetrieb durchgeführt. Hierbei ist das Fließband mäanderförmig mit bis zu 12 Schlaufen in einer Halle aufgebaut. Typischerweise gibt es einen Anlieferungsbereich der zu montierenden Teile als Schnittstelle zur Intralogistik, in dem die Bauteile zur Aufnahme durch die Monteure in einer Teilevorhaltung gelagert werden.

Bei der Außen- und Innenraummontage arbeiten meist mehrere Monteure im Team. Das Fahrzeug wird dabei konstant durch das Fließband vorwärts bewegt. Zwei Monteure nehmen ein sperriges Einbauteil, z.B. ein Schiebedach, aus

Innenmontage



Abb. 3-11.1 Innenmontage am Fließband

der Teilevorhaltung auf und platzieren es an der gewünschten Position im Inneren des Fahrzeugs. Nach der erfolgten Positionierung verbinden sie das Bauteil mit dem Fahrzeug mit mehreren Schrauben oder ähnlichen Verbindungselementen im Innenraum. Danach verlassen sie den Innenraum wieder und gehen zur Montage des nächsten Bauteils über. Dieser Vorhang wiederholt sich so oder in ähnlicher Form bis alle im Fahrzeuginnenraum durch die Werker zu montierenden Teile eingebaut sind und der darauf folgende Produktionsschritt an der nächsten Fließbandstation erfolgen kann.

Definitionsgemäß handelt es sich in dem nachfolgend beschriebenen Szenario um den Einsatz von Industrierobotern. Die Anwendung wird jedoch als Serviceroboter-Szenario beschrieben, um zu verdeutlichen, dass:

- Anforderungen an Technologien, Komponenten und Systemgestaltung vergleichbar mit denen anderer gewerblicher Serviceroboter-Szenarien sind und
- Das EFFIROB-Methodenwerk gleichermaßen für produktionsstechnische Szenarien anwendbar ist.



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

Sequenzdiagramm

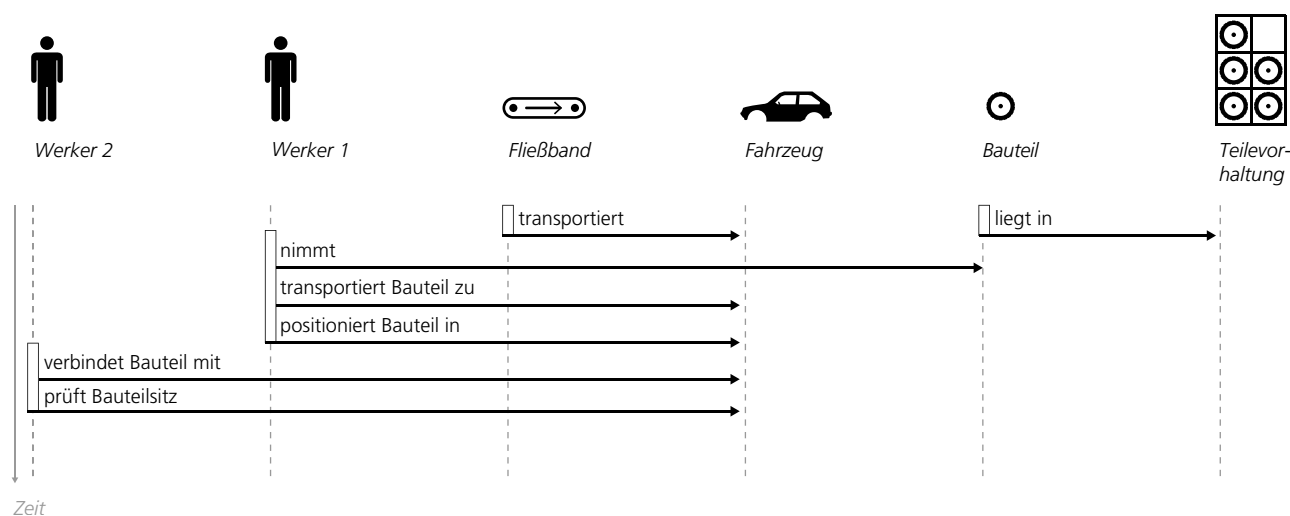


Abb. 3-11.2 Sequenzdiagramm. Ein Montageteam aus 2 Workern in der Kfz-Montage verbaut ein zugeliefertes sperriges Bauteil

1.2 Probleme

Typische Herausforderungen im Produktionsbereich Fahrzeug-Montage:

- Automatisierungsgrad geringer als 20%
- Fachkräftemangel durch die demografische Entwicklung
- Abwanderung der Produktion in Billiglohnländer
- Hoher Kostendruck durch internationalen Wettbewerb
- Hohe Bauteilvielfalt in der Montage
- Eingeschränkte Zugänglichkeit im Fahrzeuginnenraum (Ergonomie)
- Keine Vollständigkeitsprüfung, die Dokumentation des Montagefortschritts erfolgt bislang nur manuell

1.3 Verbesserungspotenziale durch Servicerobotik

Ansätze zur Verbesserung des Montage-Prozesses und zur Kostenreduktion durch Servicerobotik:

- Ziel: Statt Abwanderung der Produktion Erhöhung der Automatisierungsquote durch Serviceroboter-Einsatz; weniger Mitarbeiter in der Montage würden die Kosteneffizienz steigern und die internationale Wettbewerbsfähigkeit erhöhen. Bis dato: Zwei Mitarbeiter pro Station in der Innenraum-Montage; hier wäre mit einer Serviceroboter-Lösung nur noch ein Mitarbeiter nötig.
- Plug-&-Play-Robotersystem mit wiederverwendbaren Werkzeugen und höherer Greifer-Flexibilität ermöglicht die teilautomatisierte Montage, die Stückzahlflexibilität bietet für hohe Produktionsmengen zu Beginn eines Modellzyklus und niedrige Produktionsmengen am Ende eines Modellzyklus.
- Durch den Einsatz von Robotern können durchgeführte Montageprozesse online dokumentiert und so die Qualitätssicherung vereinfacht werden.
- Körperliche Entlastung von Mitarbeitern.



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10



11

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 1 KURZBESCHREIBUNG DES ANWENDUNGSFALLES

i



1.4 Weiterführende Informationen

1.4.1 Anwenderbranche

Produzierendes Gewerbe – Automobilproduktion

- Die Jahresproduktion an einem größeren Beispiel-Standort beläuft sich auf 320 000 Fahrzeuge.
- Die Produktion erfolgt meist im Zwei-Schicht-Betrieb
- Montage wird heute meist manuell ausgeführt, d.h. 60% der Mitarbeiter am Produktionsstandort sind in der Montage beschäftigt
- Ein Standort umfasst beispielsweise für drei Baureihen eines Automobilherstellers 16 800 Mitarbeiter in der Montage
- Hoher Kostendruck; Kosten maßgeblich geprägt durch den Personaleinsatz
- Hohe Bauteil- und Variantenvielfalt.

1.4.2 Einsatzbereich

Automobilproduktion – Innenraummontage

- Produzenten im Bereich der Automobilindustrie
- Großserienproduktion im Fließprozess
- Montage im Innenraum von Fahrzeugen mit einem heutigen Automatisierungsgrad von 15 bis 20%
- Hochkomplexe, variantenintensive Produkte unterschiedlichster Ausprägung
- Die Ausschuss- und Nachbesserungsrate in der Montage sollte bei 0% liegen
- Werkzeuge in der Produktion werden nach Ende der Produktgeneration häufig entsorgt und sind nicht wiederverwendbar.

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2 Systemkonzepte

2.1 Aufgaben des Serviceroboters

Im Bereich der Innenraummontage in einem Produktionswerk für Kraftfahrzeuge ist das Fließband mäanderförmig aufgebaut. Es gibt mehrere Montagepositionen, vgl. Abb. 3-11.3 Pos. 2 bis Pos. 6, in denen ein Werker Bauteile, wie z.B. Schiebedächer, Dachhimmel und Abdeckungen, im Fahrzeug montiert. Der Vorhaltebereich des jeweiligen Montageplatzes (M2 bis M6) sorgt hierbei für die Teileversorgung. Zwischen Pos. 1 und Pos. 2 setzt ein Werker ein autonomes Serviceroboter-System mit Batteriepack mit einer manuellen Hebevorrichtung, z.B. einem Balancer, in die Mitte des Fahrzeugs ein und befestigt das System über einen Rasthebel. Dieses System fährt im Fahrzeug von Pos. 2 bis Pos. 6 mit und unterstützt den Werker pro Montageplatz in der Befestigung der jeweiligen Bauteile. Das Serviceroboter-System hat hierfür einen Leichtbauroboterarm, der die Fixierung der Bauteile und gleichzeitig die Überprüfung der korrekten Montage und die Dokumentation für die Qualitätskontrolle durchführt. Jedem Werker steht der Roboterarm hierbei unterschiedlich bei. Am Ende des Mäanders zwischen Pos. 6 und Pos. 7 wird der Rasthebel des Serviceroboter-Systems gelöst und

der Serviceroboter von einem Werker mit einer manuellen Hebevorrichtung wieder auf den Ladestations-Puffer gestellt. Hier wird das Batteriepack des Serviceroboter-Systems geladen und der Zyklus beginnt von vorne.

Mäander in der Montage

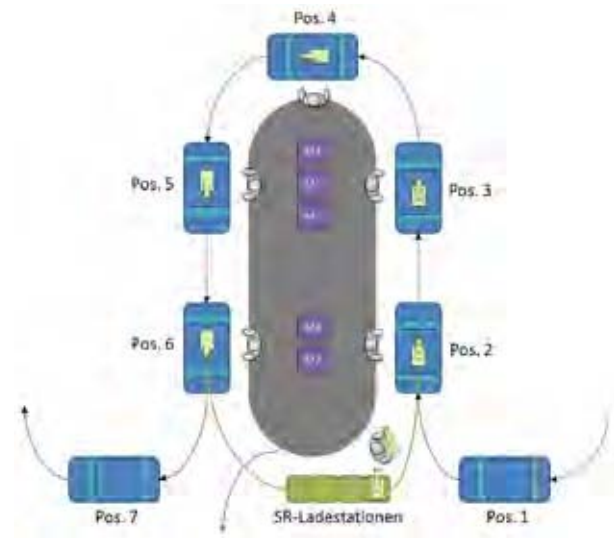


Abb. 3-11.3 Serviceroboter (SR) kooperiert mit jeweiligem Werker

Sequenzdiagramm

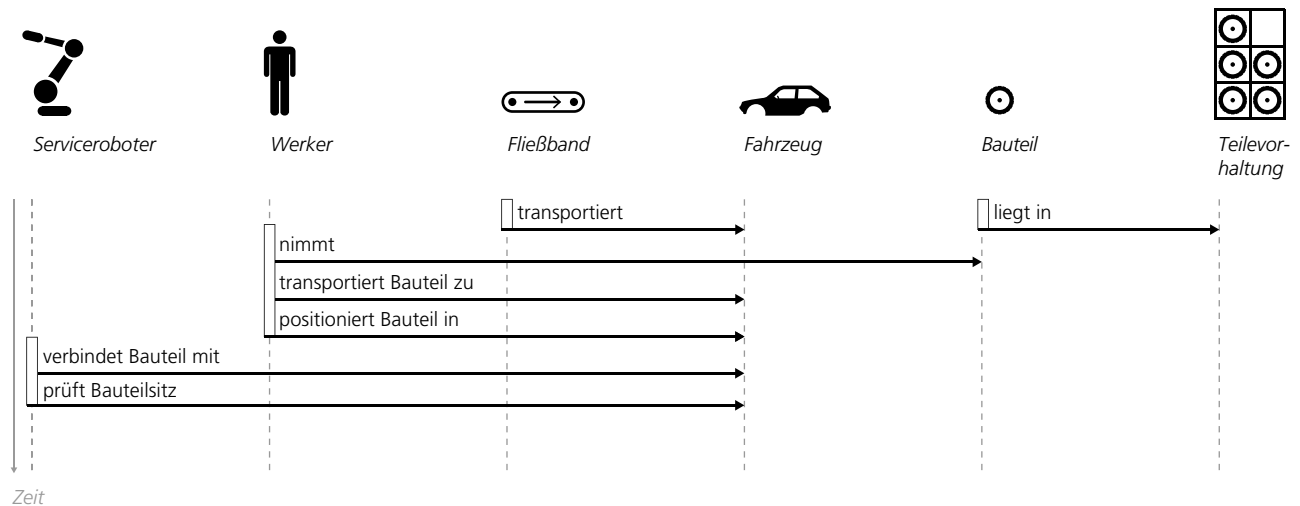


Abb. 3-11.4 Sequenzdiagramm. Beispiel: Ein Montageteam aus Werker und Serviceroboter in der Kfz-Montage verbaut ein zugeliefertes sperriges Bauteil



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2 Roboterentwurf

Der Produktionsassistent-Roboter wird als eigenständiger Werker im Bereich der Montage konzipiert. Er soll in enger Zusammenarbeit mit einem menschlichen Werker Montage- und Befestigungsoperationen im Innenraum durchführen. Typische durchzuführende Tätigkeiten sind z.B. die Befestigung des Dachhimmels, das Verlegen von Kabeln in Kabelkanälen, der Einbau von Zubehör, wie z.B. einem Schiebedach und das Festklipsen von Abdeckungen. Hierfür benötigt der Produktionsassistent-Roboter einen Manipulatorarm mit Plug-&-Work-Anbindung für Werkzeuge, eine Kraft-Momenten-Sensorik in allen bewegten

Arm- und Greifgelenken zur Kollisionserkennung, eine integrierte Stromversorgung, einen integrierten Steuerungs-PC, Sensoren für Eigenpositionierungen und für Sicherheitsfunktionen, einen Sensor im Arm zur Bauteilidentifikation, eine schnelllösbare Basisverbindung zur einfachen Befestigung des Roboters im Fahrzeuginnenraum, ein akustisches Interface zur Steuerung und Interaktion mit dem menschlichen Werker und eine Funkverbindung zum lokalen Funknetz, um Montagedaten für das aktuelle Fahrzeug empfangen und Daten über ausgeführte Operationen senden zu können.

Roboterentwurf



Abb. 3-11.5 links: Zwei Produktionsassistent-Serviceroboter auf der Ladestation am Mäanderanfang; rechts oben: Serviceroboter bei der Lenkradmontage im Kfz; rechts unten: Serviceroboter zur Innenraummontage im Kfz.

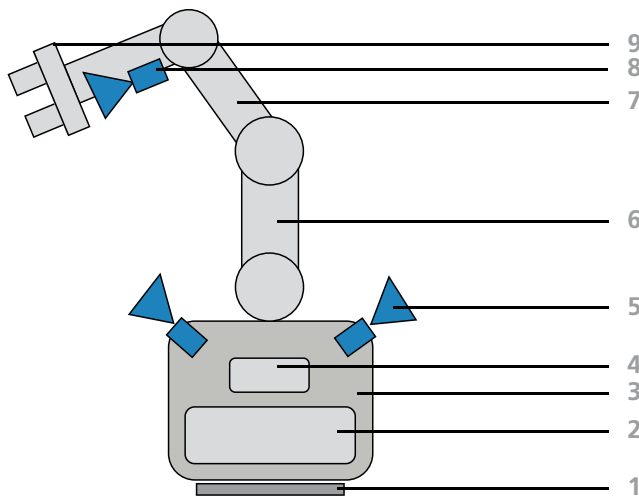


PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

2.2.1 Zentrale Hardwarekomponenten

Entwurf eines Serviceroboters zur Innenraummontage



Serviceroboter-System besteht aus:

- Schnelllösbare Basisverbindung, z.B. mechanisch oder magnetisch (1)
- Basis (3) mit integriertem Batteriepack (2) und Steuerungs-PC (4)
- Kameras zur Objekterkennung und für Sicherheitsfunktionen (5)
- Forderung: Leichtbauroboterarm mit 6 Freiheitsgraden, integrierte Kraft-Momenten-Sensorik, integrierte Motorcontroller und 25 kg Nutzlast (6)
- Forderung: In allen bewegten Achsen Kraft-Momenten-Sensorik (7) zur Kollisionserkennung
- Kamera am Arm (8)
- Leicht austauschbares Plug-&-Work-Werkzeug, z.B. Handwerkzeug, Greifer, etc. (9)
- Akustisches Interface zur Steuerung und Interaktion mit menschlichem Werker
- Wireless LAN
- Forderung: Maximalgewicht des Gesamtsystems: 25 kg zur Handhabung mit manueller Hebeeinrichtung

Abb. 3-11.6 Entwurf eines Serviceroboters zur Innenraummontage

Bauteile im Innenraum montieren

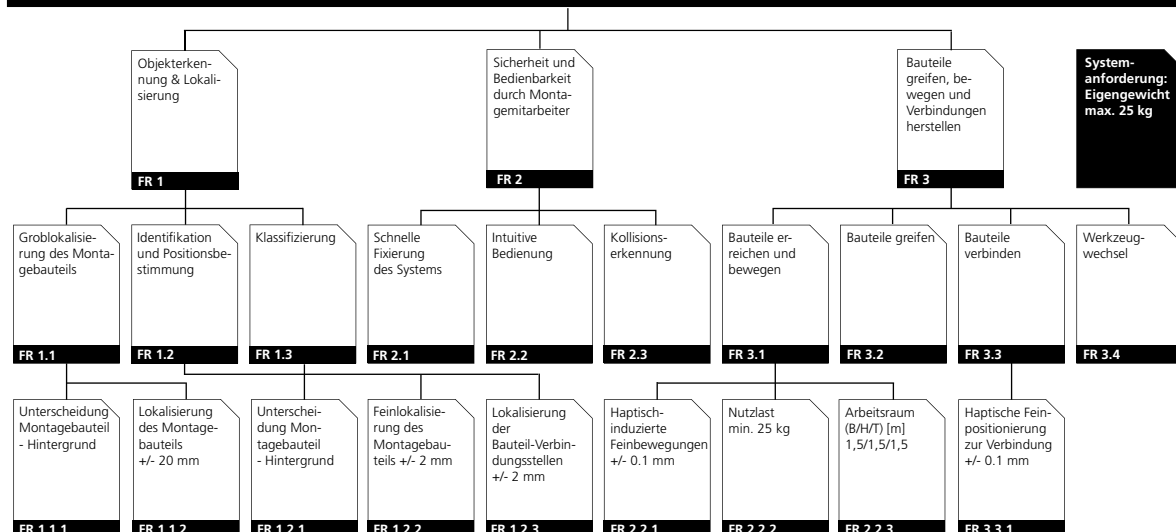


Abb. 3-11.7 Axiomatic Design – Functional Requirements



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

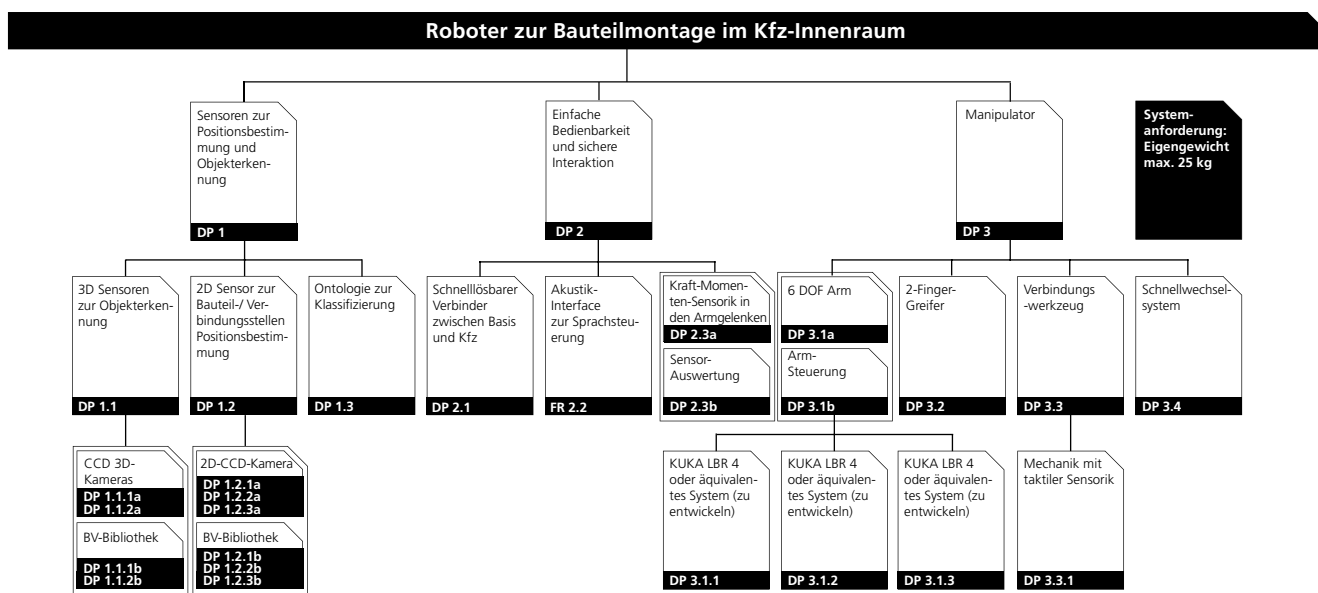


Abb. 3-11.8 Axiomatic Design – Design Parameters

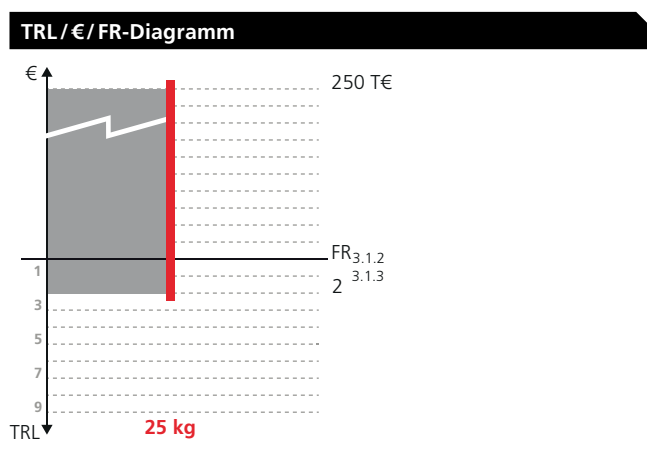


Abb. 3-11.9 TRL/€/FR-Diagramm für das Eigengewicht des Serviceroboter-Systems

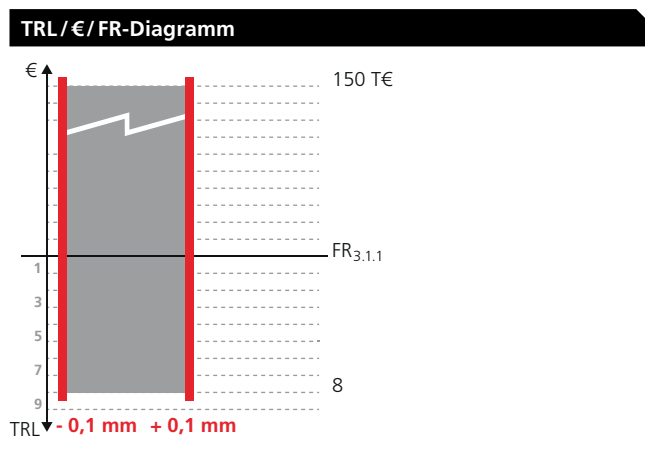


Abb. 3-11.10 TRL/€/FR-Diagramm für die haptisch induzierte Feinbewegung eines 6-DOF-Arms mit 25 kg Nutzlast (Zu entwickelnder Leichtbauroboterarm)



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10



11

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

FR 3.1.1 / 3.1.2 / 3.1.3 für einen Leichtbauroboterarm:

Wichtigste Komponente zur Ertüchtigung eines Serviceroboters zur Innenraummontage ist ein 6-DOF-Arm mit integrierter Kraft-Momenten-Sensorik zur Kollisionserkennung, der ein Eigengewicht-zu-Nutzlast-Verhältnis von besser als 1:1 aufweist. Diese Randbedingungen folgen aus einem maximalen Systemgewicht von 25 kg für den gesamten Serviceroboter, vgl. auch Abb. 3-11.9, bei gleichzeitig maximaler Zuladung des Arms von 25 kg. Hierbei sind im Systemgewicht noch sämtliche anderen Komponenten enthalten. Das einzige System mit annähernd diesen technischen Daten ist der Leichtbauroboterarm LBR4+ von KUKA mit 14 kg Eigengewicht bei aktuell 7 kg Nutzlast und fast 100 000 Euro Hardwarekosten. Obiges TRL-Diagramm in Abb. 3-11.10 zeigt einen für das Szenario notwendigen Arm mit 25 kg Nutzlast und den dafür angenommenen Kosten.

2.2.2 Software

Folgende Softwarefunktionen werden benötigt:

- Akustische Benutzerschnittstelle
 - Einfache Bedienführung
 - Vermeidung von unbefugtem Bedienen
 - Mensch-Roboter-Befehle für die Übergabe von Montage-teilen
 - Grundkomponenten verfügbar, Anpassungsaufwand niedrig bzgl. Hintergrundgeräusche und -gespräche, Fehlbedienungen ausschließen
- Objekterkennung
 - Sortenreine Erkennung von Objekten
 - Unstrukturierter Hintergrund
 - Wechselnde Beleuchtungsverhältnisse
 - Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig
- 3D-Objektlokalisierung
 - Positionsbestimmung erkannter Objekte auf ± 5 mm
 - Grundkomponenten verfügbar, objektspezifische Anpassungen nötig

- Armsteuerung
 - Trajektorienplanung und Bewegungsführung zum Greifen und Halten von Montageteilen
 - Eigen- und Fremdkollisionsvermeidung
 - Neuentwicklung notwendig, Erarbeiten neuer Sicherheitsrichtlinien für die Mensch-Maschine-Kooperation, erste Entwicklungen in der Forschung
- Ablaufsteuerung
 - Laden der CAD-Montagedaten via W-LAN für spezifisches Fahrzeug
 - Steuerung des gesamten Ablaufs (Greifen, Halten, Montieren, Verschrauben)
 - Synchronisierung mit Industrieroboter bei SR-Variante B zur Positionierung und Entnahme des Serviceroboters am Mäanderanfang durch den Industrieroboter
 - Grundkomponenten verfügbar, ablauf- und komponentenspezifische Anpassungen nötig

2.2.3 Varianten

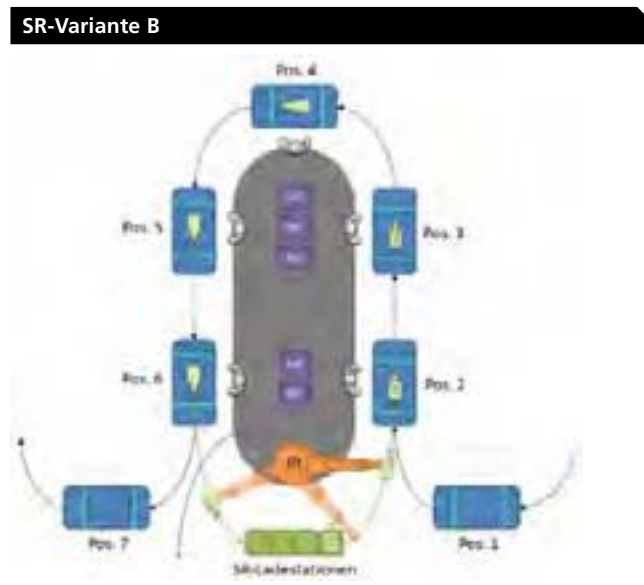


Abb. 3-11.11 SR-Variante B: Ein Mäander in der Montage: Serviceroboter (SR) kooperiert mit jeweiligem Werker, Industrieroboter (IR) zum Serviceroboter-Handling am Mäanderanfang



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

SR-Variante B:

Im Bereich der Innenraummontage in einem Produktionswerk für Kraftfahrzeuge ist das Fließband mäanderförmig aufgebaut. Es gibt mehrere Montagepositionen, vgl. Abb. 3-11.11 Pos. 2 bis Pos. 6, in denen ein Werker Bauteile im Fahrzeug montiert. Der Vorhaltbereich des jeweiligen Montageplatzes (M2 bis M6) sorgt hierbei für die Teileversorgung.

Zwischen Pos. 1 und Pos. 2 setzt in SR-Variante B ein Industrieroboter ein autonomes Serviceroboter-System mit Batteriepack in die Mitte des Fahrzeugs ein und befestigt das System über einen Rasthebel. Dieses Serviceroboter-System fährt im Fahrzeug von Pos. 2 bis Pos. 6 mit und unterstützt den jeweiligen Werker pro Montageplatz bei der Befestigung der jeweiligen Bauteile. Das Serviceroboter-System hat hierfür einen Leichtbauroboterarm (z.B. LWA 3), der die Fixierung der Bauteile und gleichzeitig die Überprüfung der korrekten Montage und die Dokumentation für die Qualitätskontrolle durchführt. Jedem

Werker steht der Roboterarm hierbei unterschiedlich bei. Am Ende des Mäanders zwischen Pos. 6 und Pos. 7 wird der Rasthebel des Serviceroboter-Systems durch den Industrieroboter gelöst und der Serviceroboter von diesem auf den Ladestations-Puffer gestellt. Hier wird das Batteriepack des Serviceroboter-Systems geladen und der Zyklus beginnt von vorne.

Da bei der SR-Variante B ein Industrieroboter die Verbringung des Serviceroboters in das Kfz hinein und wieder heraus übernimmt, wird die Anforderung an die Eigenmasse des Serviceroboters von 25 kg auf 50 kg abgeschwächt. Durch die Reduktion dieser Forderung ist des Weiteren eine schnellere Realisierbarkeit des Systems mit in näherer Zukunft verfügbaren Bauteilen möglich. Es kann hier auf einen noch zu entwickelnden Leichtbauroboterarm verzichtet werden und somit zeitnäher ein System für die Produktionsassistenz mit bestehenden Komponenten realisiert werden.

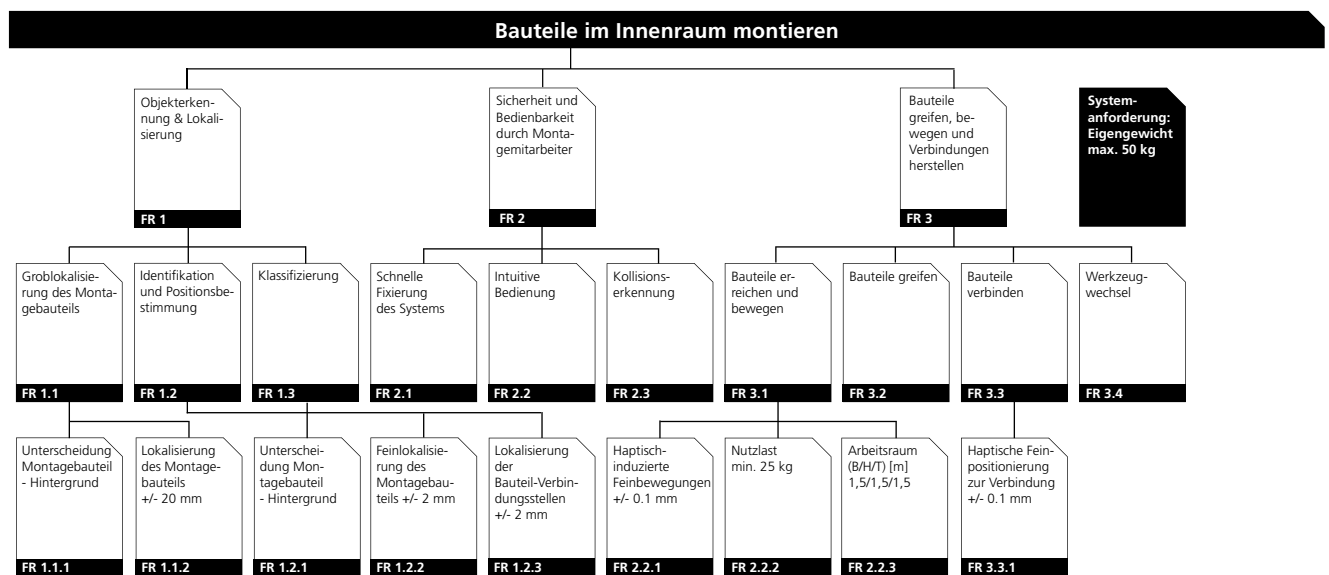


Abb. 3-11.12 Axiomatic Design – Functional Requirements – SR-Variante B



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

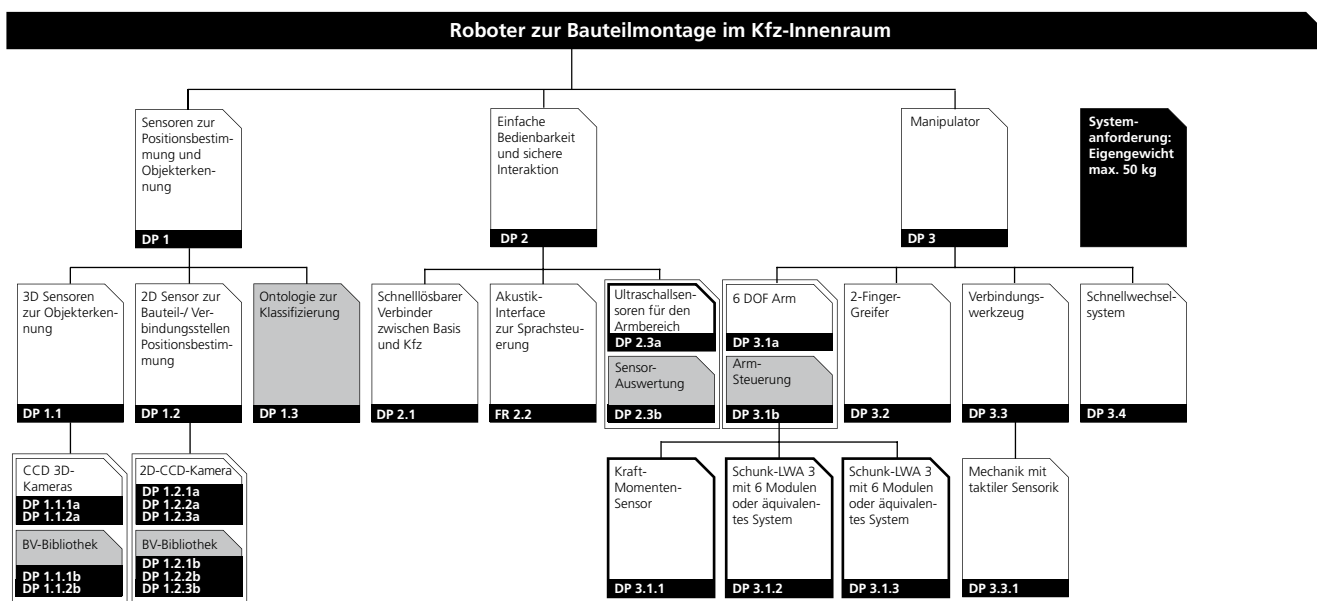


Abb. 3-11.13 Axiomatic Design – Design Parameter – SR-Variante B



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10



11

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 1.1 Groblokalisierung des Montagebauteils	FR 1.1.1 Unterscheidung Montagebauteil / Hintergrund	DP 1.1.1b/1.1.2b BV-Bibliothek		7	2	Erkennung muss unter unterschiedlichen Lichtverhältnissen zuverlässig sein
		DP 1.1.1a CCD-3D Kamera	7 500 €	9	2	Geringe Auflösung der Sensordaten (max. 200 x 200 px, Genauigkeit +/- 10 mm)
	FR 1.1.2 Lokalisierung des Montagebauteils: +/- 20 mm	DP 1.1.2a CCD-3D Kamera	7 500 €	9	2	siehe DP 1.1.1a
FR 1.2 Identifikation und Positionsbestimmung	FR 1.2.1 Unterscheidung Montagebauteil / Hintergrund	DP 1.2.1b/1.2.2b/1.2.3b BV-Bibliothek		7	2	siehe DP 1.1.1b
		FR 1.2.2 Feinlokalisierung des Montagebauteils: +/- 2 mm				
	FR 1.2.3 Lokalisierung der Bauteil-Verbindungsstellen: +/- 2 mm	DP 1.2.3a Eine 2D-CCD Kamera	2 000 €	9	2	keine
FR 1.3 Klassifizierung		DP 1.3 Ontologie zur Klassifizierung		7	2	1. Robustheit der Klassifikation. Es müssen 100% der Bauteile erkannt werden unter „Montagebedingungen“ 2. Fehlklassifikationen müssen ausgeschlossen werden 3. Keine existierenden allgemeingültigen Klassifikatoren: je nach Anwendung müssen spezifische Merkmale zur Klassifikation entwickelt werden
FR 2.1 Schnelle Fixierung des Systems	Schnelle Befestigung des Systems im Innenraum des Kfz	DP 2.1 Schnelllösbarer Verbinder zwischen Basis und Kfz	500 €	9	1	keine

>>



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 2 SYSTEMKONZEPTE

Nr. und Name des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Nr. und Name der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 2.2 Intuitive Bedienung	Einfache und intuitive Bedienung möglich	DP 2.2 Akustik-Interface zur Sprachsteuerung	300 €	7	2	Unterscheidung verschiedener Personen. Zuverlässige Funktion auch bei Hintergrundgeräuschen
FR 2.3 Kollisionserkennung	Arbeitsraum des Armes absichern, Sicherheitszertifiziert	DP 2.3a Kraft-Momenten-Sensorik in allen Armgelenken		9	2	keine
		DP 2.3b Sensorauswertung		7	2	Sichere Sensorauswertung (Unterscheidung Kollision und Positionierung Bauteil)
FR 3.1 Bauteile erreichen und bewegen	FR 3.1.1 Haptisch induzierte Feinbewegung +/- 0,1 mm	DP 3.1a /3.1.1. /3.1.2. /3.1.3 6-DOF Leichtbauarm mit Kraft-Momenten-Sensorik	150 000 €	7	2	25 kg Nutzlast bei <25kg Eigengewicht; angenommene Kosten, Gerät noch nicht am Markt verfügbar
	FR 3.1.2 Nutzlast min. 25kg	DP 3.1b Armsteuerung		9	2	keine
	FR 3.1.3 Arbeitsraum (B/H/T) [m³] 1,5x1,5x1,5					
FR 3.2 Bauteile greifen		DP 3.2 2-Finger-Greifer	10 000 €	7	1	Flexibles System zur Handhabung unterschiedlichster Komponenten notwendig
FR 3.3 Bauteile verbinden	FR 3.3.1 Haptische Feinpositionierung zur Verbindung +/- 0,1 mm	DP 3.3.1 Mechanik mit taktiler Sensorik		7	2	siehe DP 3.1a
FR 3.4 Werkzeugwechsel		DP 3.4 Schnellwechselsystem		9	1	keine

SR-Variante B:

Name und Nr. des FR (nach Axiomatic Design)	Anforderung (falls nicht quantifizierbar, kurze Erläuterung)	Name und Nr. der zugehörigen DPs (nach Axiomatic Design)	Kosten (Komponente)	TRL	Relevanz für Szenario	Kritische Parameterkombinationen/ derzeitige Hemmnisse
FR 2.3 Kollisionserkennung	Arbeitsraum des Armes absichern, Sicherheitszertifiziert	DP 2.3a Ultraschallsensoren für den Armbereich	1 000 €	9	2	keine
FR 3.1 Bauteile erreichen und bewegen	FR 3.1.1 Haptisch induzierte Feinbewegung +/- 0,1 mm	DP 3.1.1 Kraft-Momenten-Sensor	7 500 €	9	2	keine
	FR 3.1.2 Nutzlast min. 25 kg	DP 3.1.2/3.1.3 Schunk-Arm mit 6 Modulen oder äquivalentes System	75 000 €	9	2	Höheres Eigengewicht, damit höheres Gesamtgewicht; angenommene Kosten, Gerät noch nicht am Markt verfügbar
	FR 3.1.3 Arbeitsraum (B/H/T) [m³] 1,5x1,5x1,5	DP 3.1b Armsteuerung		9	2	keine

Tab. 3-11.1 Komponentenübersicht

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Serviceroboterlösung vs. Status quo

3.1 Life Cycle Costs

3.1.1 Übersicht

Kennzahlen	SR-Variante A		SR-Variante B (mit IR)		Manuelle Alternative	
Grunddaten Use Case						
• Lebensdauer (a)		8		8		8
• Anzahl Roboter(System)		6		6		-
• Eff. Produktivzeit (h/a)		4 320		4 320		4 560
• Personalstunden (h/a)		24 000		24 000		43 200
• Leistungseinheiten (Pkw/a)		21 600		21 600		22 800
LCC-Summe (T€)	9 638,8	100%	8852,1	100%	11 781,8	100%
• Investition	1 594,3	16,5%	1 149,7	13,0%	0,0	0,0%
• Installationskosten	20,0	0,2%	20,0	0,2%	0,0	0,0%
• Aktivitätskosten	6 717,0	69,7%	6 724,2	76%	11 781,8	100,0%
• Wartung / Instandhaltung	1 307,5	13,6%	958,2	10,8%	0,0	0,0%
• Andere	-	-	-	-	-	-
DCF (@10%, T€)	-6 965,5		-6292,9		-7 856,9	
Softwarekosten (T€)	4 422,0		4 422,0		-	
Leistungskosten (€/Pkw)	55,78		51,23		64,59	

Tab. 3-11.2 LCC

Erläuterung zu Tabelle 3-11.2:

Im Folgenden werden die Berechnungen in Tabelle 3-11.2 ausgehend von SR-Variante A beschrieben, d.h. es werden hinsichtlich der anderen Alternativen nur die berechnungsrelevanten Unterschiede aufgezeigt.

Grunddaten: Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird von einem ganzjährigen Einsatz der Serviceroboter ausgegangen (300 Tage aktiv, Rest Werksurlaub). Es werden jeweils 6 Serviceroboter (je 1 pro Station + Reserve) in einem Zwei-Schicht-Modell bei 8 h Schichtdauer mit jeweils 5 Personen eingesetzt (je 1 pro Station). Die Verfügbarkeit des Roboters wird mit 90% angesetzt (technischer Ausfall),¹ so dass die effektive Produktivzeit 4 320 h/a beträgt. Das System hat einen Montage-Durchsatz von ~ 5 Pkw/h zu bewältigen (80 Pkw/Tag; 21 600 Pkw/a).

SR-Variante B: In SR-Variante B übernimmt ein konventioneller

Industrie-Roboter (IR) das „Bestücken“ der Pkw mit dem Serviceroboter. Ansonsten keine Änderungen.

Manuelle Alternative: In der manuellen Alternative sind 9 Mitarbeiter pro Schicht notwendig (durchschnittlich 1,8 Personen pro Station). Die Verfügbarkeit des Systems wird mit 95% angesetzt, so dass sich die effektive Produktivzeit entsprechend erhöht (4 560 h/a; 22 800 Pkw/a).

Investition: Relevant für den Vergleich der Lebenszykluskosten über die verschiedenen Alternativen sind hier nur die zusätzlichen Kosten für die Roboter – die sonstige Peripherie/Infrastruktur ist über alle Alternativen gleich. Der Systempreis ergibt sich aus der Summe der Komponentenkosten (204,4 Tsd Euro pro Roboter) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

SR-Variante B: Aufgrund der technischen geänderten Konfiguration ist die Summe der Komponentenkosten geringer als in der SR-Variante A (137,4 Tsd Euro pro Serviceroboter; 60 Tsd Euro für den konventionellen IR) – hinzu kommt ein 30%-iger Gewinnaufschlag auf Seiten des Systemintegrators.

¹ 5% Abschlag zur manuellen Alternative, da der Reserve Roboter im Falle eines Ausfalls des SR in der Linie nicht sofort einsetzbar ist (defekter SR muss erst entfernt werden)



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

Ansonsten keine Änderungen.

Manuelle Alternative: Keine zusätzliche Investition notwendig.

Installationskosten: Für die Planung bzw. (Erst-)Einrichtung des Systems wird ein externer Personalaufwand von 20 PT (160 Ph) angesetzt; die notwendige Schulung des Personals erhöht den Aufwand noch einmal um 5 PT (40 Ph). Beide Aufgaben werden durch den Systemintegrator übernommen (100 Euro/Ph).

SR-Variante B: Keine Änderung.

Manuelle Alternative: Keine Aufwände.

Aktivitätskosten: Die Personalkosten werden für das Personal an den Arbeitsstationen mit 34 Euro/h angesetzt (höher qualifiziertes Personal; 220 Arbeitstage, 8 Stunden, Lohn/Gehalt 40 Tsd Euro + 50% Personalnebenkosten). Der Energieverbrauch pro Roboter beträgt 0,272 kW pro Roboter (insgesamt 7 041,6 kWh/a). Die Energiekosten werden mit 0,14 Euro/kWh veranschlagt. Weitere Betreuungskosten der Roboter: Prüfung der Sensorik, Werkzeugvorbereitung, etc. werden in den Nebenzeiten durch qualifizierte Techniker durchgeführt und entsprechend verrechnet (1 h/Schicht; 34 Euro/h).

SR-Variante B: Der Energieverbrauch des IR wird mit 1,5 kW angesetzt (insgesamt 6 480,0 kWh/a). Ansonsten keine Änderung.

Manuelle Alternative: Keine zusätzlichen/anderen Aufwände.

Wartungs- und Instandhaltungskosten: Die Wartung und Instandhaltung findet in den Nebenzeiten statt und wird mit 5 PT (40 Ph) pro Jahr veranschlagt. Sie wird durch externes Personal durchgeführt. Dafür wird ein Stundensatz von 100 Euro/h angesetzt – anfallende Sachkosten (z.B. durch Tausch der Energiespeicher, Manipulatoren, etc.) werden auf 10% der Investitionssumme p.a. veranschlagt.

SR-Variante B: Für die Wartung des IR fällt zusätzlich 1 PT (8 Ph) an (weniger anfällig als die Serviceroboter).

Manuelle Alternative: Keine zusätzlichen/anderen Aufwände

Softwarekosten: geschätzt nach vorgestellter Methodik ([s. Kap. 2.3.1.2](#)) 4.422 Tsd Euro für SR-Variante A und SR-Variante B.

3.1.2 Einschätzung

- Beim Serviceroboter-Anwendungsfall handelt es sich um eine Automatisierungslösung, bei der im Vergleich zur manuellen Alternative die Anzahl der zum Betrieb notwendigen Personen von 9 auf 5 Personen reduziert wird. Es wird angenommen, dass der nominale Durchsatz aller Alternativen gleich ist und das System immer voll ausgelastet ist.
- **Kostenstruktur:** Auch in den Serviceroboter-Szenarien stellen die Aktivitätskosten mit ca. 70% Anteil an den Lebenszykluskosten den größten Kostenblock dar, was fast ausschließlich auf die Lohnkosten der verbliebenen Arbeitskräfte zurückzuführen ist.
- **Wirtschaftlichkeit:** Die SR-Varianten sind gegenüber der manuellen Alternative deutlich günstiger – sowohl im Rahmen der (relevanten) Stückkosten (55,78 bzw. 51,23 Euro/Pkw vs. 64,59 Euro/Pkw als auch aus einer finanzwirtschaftlichen Perspektive basierend auf dem DCF (Tsd Euro -6 965,5 bzw. -6 292,9 vs. -7 856,9²) – und das trotz der geringeren Verfügbarkeit der SR-Varianten. Bzgl. der laufenden Kosten führen die SR-Varianten im Vergleich zur manuellen Alternative zu einer Ersparnis von 3 137,2 bzw. 3 479,3 Tsd Euro, so dass bei 8 Jahren Lebensdauer eine Amortisation der Investition rechnerisch nach etwa 4 bzw. nach deutlich unter 3 Jahren möglich ist.³

² Die negativen Kapitalwerte sind auf die fehlende Berücksichtigung der „Ertragsseiten“ zurückzuführen (diese konnten im vorliegenden Fall nicht ermittelt werden).

³ Beispielrechnung: Ersparnis SR-Variante A = $0,9/0,95 \cdot 11.781,8 - (6.717,0 + 1.307,5) = 3.137,2 >> (1.594,3 + 20,0)$. Amortisationsdauer = $(1.594,3 + 20,0) / 3.137,2 \cdot 8 = 4,1$. Die Amortisationsrechnung bedingt eine Angleichung des Leistungsvolumens aller zu vergleichenden Alternativen. Daher müssen die Kosten der manuellen Alternative entsprechend der geringeren Leistungsmenge der SR-Variante angepasst werden (es fallen nur Aktivitätskosten an – diese verhalten sich proportional zur Leistungsmenge; 90%/95%).



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10



11

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 3 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE: SERVICEROBOTERLÖSUNG VS. STATUS QUO

- **Sensitivität:** Auf Grund der Kostenstruktur sowie der gegebenen Rahmenbedingungen kommt als einzig relevanter Parameter für eine Sensitivitätsanalyse die „Verfügbarkeit“ des Systems in Frage (alle anderen Parameter ändern sich im Falle der Szenarien gleichmäßig und proportional oder sind im Vergleich zu ihrem Gewicht bezüglich der Aktivitätskosten irrelevant). In diesem Sinne erscheint das Ergebnis robust,
 - da selbst im Falle einer reduzierten Verfügbarkeit von 80% die Stückkosten in den SR-Varianten mit jeweils 62,75 bzw. 57,62 Euro/Pkw unter denen der manuellen Alternative liegen.
 - Zudem bestünde die Möglichkeit, die Verfügbarkeit durch die Installation weiterer Serviceroboter als Reserve zu erhöhen. Würde man beispielsweise einen weiteren Serviceroboter als Reserve installieren (also 7 Serviceroboter insgesamt) und damit die Verfügbarkeit auf 95% erhöhen, so würden die Stückkosten mit 55,48 bzw. 50,31 Euro/Pkw tatsächlich sogar noch unter denen der hier gerechneten SR-Varianten liegen.

3.2 Nutzwert

- Verbesserung der Montagequalität hinsichtlich Fehlervermeidung
- Automatische Dokumentation der montierten Teile





PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

4 Marktdaten

Ziel dieses Kapitels ist die Einschätzung der Marktpotenziale für das betrachtete Serviceroboter-Anwendungsszenario. Entsprechend der dieser Studie zugrunde liegenden Methodik wird dieses hier auf Basis der den relevanten Akteuren zur Verfügung stehenden Finanzmittel abgeleitet. Dazu wird im nächsten Abschnitt zunächst der relevante Markt auf Basis wesentlicher Strukturdaten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird anschließend das spezifische Marktpotenzial für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario abgeschätzt und beurteilt.

4.1 Marktstrukturdaten

4.1.1 Allgemeine Charakterisierung des Marktes „Verarbeitendes Gewerbe“

Statistisch werden unter dem Verarbeitenden Gewerbe eine Vielzahl unterschiedlicher Branchen zusammengefasst und damit der Großteil der deutschen, produzierenden Industrie abgebildet.⁴ Da hier nicht sämtliche Details für alle Teilbranchen aufgeführt werden können, fassen Tab. 3-11.3 und Tab. 3-11.4 die wesentlichen Strukturdaten für das gesamte Verarbeitende Gewerbe zusammen:

⁴ Folgende Branchen werden unter dem „Verarbeitenden Gewerbe“ (WZ2008 C) zusammengefasst: Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (WZ08-10); Getränkeherstellung (WZ08-11); Tabakverarbeitung (WZ08-12); Herstellung von Textilien (WZ08-13); Herstellung von Bekleidung (WZ08-14); Herstellung von Leder, Lederwaren und Schuhen (WZ08-15); H. v. Holz-, Flecht-, Korb- u. Korkwaren (ohne Möbel) (WZ08-16); Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus (WZ08-17); H. v. Druckerz., Vervielf. v. Ton-, Abb-, Datenträgern (WZ08-18); Kokerei und Mineralölverarbeitung (WZ08-19); Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ08-20); Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen (WZ08-21); Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren (WZ08-22); H. v. Glas-, wahren, Keramik, Verarb. v. Steinen u. Erden (WZ08-23); Metallherzeugung und -bearbeitung (WZ08-24); Herstellung von Metallherzeugnissen (WZ08-25); H. v. DV-Geräten, elektron. u. opt. Erzeugnissen (WZ08-26); Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ08-27); Maschinenbau (WZ08-28); Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen (WZ08-29); Sonstiger Fahrzeugbau (WZ08-30); Herstellung von Möbeln (WZ08-31); Herstellung von sonstigen Waren (WZ08-32); Reparatur u. Installation von Masch. u. Ausrüstungen (WZ08-33)

Unternehmen	36 287
Beschäftigte	6 065 704
Umsatz (in T€)	1 778 831 953
Bruttowertschöpfung (in T€)	472 219 453

Tab. 3-11.3 Kennzahlen des Verarbeitenden Gewerbes 2008⁵

2008 zählte das Verarbeitende Gewerbe mehr als 36 000 Unternehmen, die mit mehr als 6 000 000 Beschäftigten einen Umsatz von fast 1 800 Mrd Euro erwirtschafteten (Wertschöpfungsquote ~26,5%). Kleine und mittlere Unternehmen mit bis zu 250 Mitarbeitern machen mit einem Anteil von 89% den Großteil der Unternehmen aus und knapp 40% der Arbeitsplätze.

Mitarbeiter	Unternehmen	Beschäftigte
20 - 49	15 397	42%
50 - 99	9 571	26%
100 - 249	7 149	20%
250 - 499	2 453	7%
500 - 999	1 047	3%
1000 und mehr	670	2%
Insgesamt	36 287	100%

Tab. 3-11.4 Größenstrukturen im Verarbeitenden Gewerbe 2008⁶

Lage in der deutschen Industrie:

In seiner Analyse zur Lage in der deutschen Wirtschaft stellt der Bund der Deutschen Industrie (BDI) zuletzt fest, dass sich die deutsche Industrie nach den dramatischen Einbrüchen in der historischen Weltwirtschaftskrise der Jahre 2008 und 2009 überraschend schnell und vergleichsweise stark erholt⁷ mit

⁵ Statistisches Bundesamt (2010): Kostenstrukturerhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008. (www.destatis.de); erfasst werden nur Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern.

⁶ Statistisches Bundesamt (2010): Kostenstrukturerhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008. (www.destatis.de); erfasst werden nur Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern.

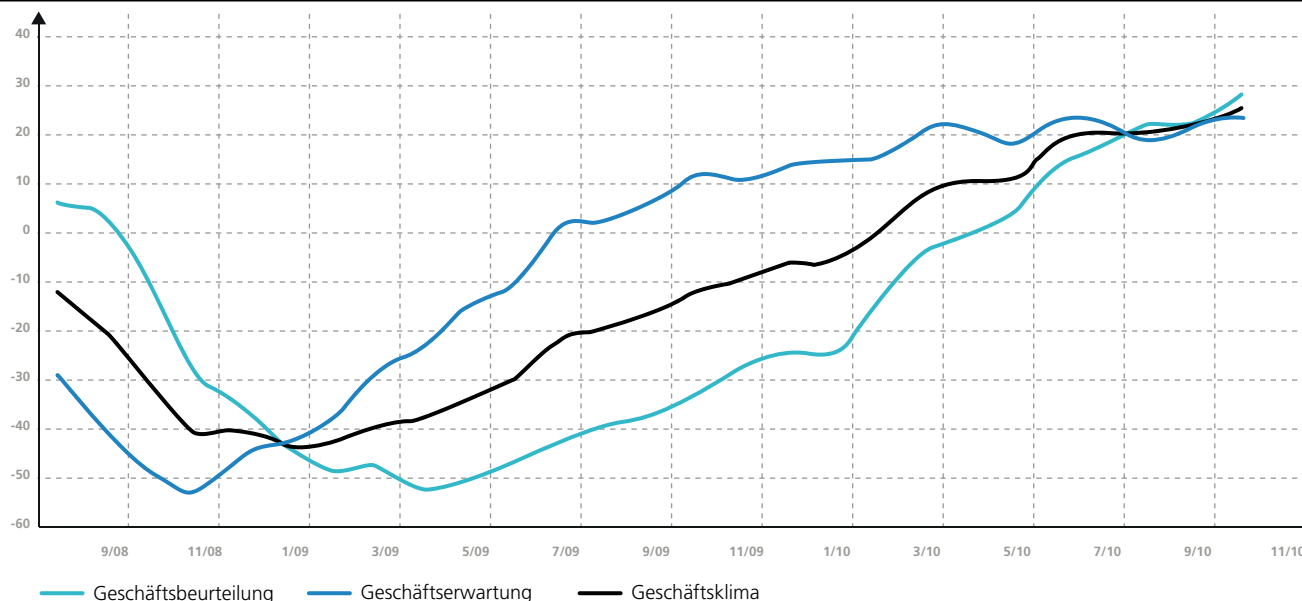
⁷ Vgl. im Folgenden BDI (2010): Konjunktur-Report. Ausgabe 04, 21.10.2010. (www.bdi.eu)



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

Geschäftsklima im Verarbeitenden Gewerbe*



* Salden, Saisonbereinigt, mit Nahrungs- und Genussmittelindustrie
Quelle: ifo Institut, Stand vom 24. November 2010

** Vgl. im Folgenden BDI (2010): Konjunktur-Report. Ausgabe 04, 21.10.2010. (www.bdi.eu)

Abb. 3-11.14 Geschäftsklima im Verarbeitenden Gewerbe 2008**

weiterhin positiver Tendenz (vgl. Abb. 3-11.14). Dabei ist zu beobachten, dass nicht nur die Exporte als traditioneller Treiber der wirtschaftlichen Entwicklung Deutschlands zugelegt haben, sondern auch die Investitionen und insbesondere der private Konsum zunehmend positive Wachstumsbeiträge leisten.

Investitionsverhalten:

Im Jahr 2008 investierten die Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes insgesamt 58 787 Mio Euro (vgl. Tab. 3-11.5), was einer Investitionsquote von ~3,3% am Umsatz entsprach (vgl. Tab. 3-11.3). Dabei sind Investitionen in Maschinen mit einem Anteil von 87% die mit Abstand wichtigste Anlageinvestition (51 255 Mio Euro). Im Vergleich dazu betragen die Abschreibungen 2008 ca. 47 240 Mio Euro und erreichten damit insgesamt 80,4% des Investitionsumfanges (siehe Ersatzinvestitionen)

– es stehen also etwa 20% der Finanzmittel für Erweiterungs- und Rationalisierungsinvestitionen zur Verfügung.⁸

Investitionen gesamt (in T€)	58 787 479
davon Maschinen (in T€/Prozent)	51 255 398 (87,2%)
Abschreibungen (in T€)*	47 240 651

* Statistisches Bundesamt (2010): Kostenstrukturerhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008.

Tab. 3-11.5 Investitionsverhalten im Verarbeitenden Gewerbe 2008⁹

⁸ Dieser Vergleich dient nur als grobe Näherung; der Vergleich von Investitionen und Abschreibungen ist also nur ein Indikator für den Anteil der Ersatzinvestitionen.

⁹ Statistisches Bundesamt (2010): Investitionserhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008. (www.destatis.de)



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10



11

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

In diesem Zusammenhang stellte der BDI allerdings fest, dass die aktuelle Ausrüstungsinvestitionstätigkeit (2010) krisenbedingt vor allem durch notwendige Ersatzinvestitionen geprägt ist und erst allmählich aufgeschobene Investitionen nachgeholt werden, mit denen die Unternehmen ihre Kapazitäten erweitern.

4.1.2 Spezifische Charakterisierung des Teilmarktes „Produktionsassistenz“

Prinzipiell denkbar ist der Einsatz des hier beschriebenen Serviceroboters in allen Branchen der stückgutproduzierenden Industrie, die große, mittelkomplexe bis komplexe Produkte in Serienfertigung herstellen. Zwei Branchen, für die dies zutrifft und die darüber hinaus eine besondere Bedeutung für die deutsche Industrie darstellen, sind der Maschinen- und Anlagenbau (WZ08-28) sowie der Automobilbau (WZ08-29). Sie werden daher im Folgenden als primäre Zielgruppe für das hier beschriebene Anwendungsszenario definiert. Die folgenden Tabellen ergänzen daher die obigen Marktstrukturdaten spezifisch mit Daten aus diesen beiden Sektoren (vgl. Tab. 3-11.6, Tab. 3-11.7 und Tab. 3-11.8).

	Maschinen- und Anlagenbau	Automobilbau
Unternehmen	5 419	1 055
Beschäftigte	1 009 185	786 954
Umsatz (in T€)	232 016 419	342 134 345
Bruttowertschöpfung (in T€)	74 774 260	59 043 301

Tab. 3-11.6 Kennzahlen des Maschinen- und Anlagenbaus sowie des Automobilbaus 2008¹⁰

	Maschinen- und Anlagenbau	Automobilbau
Investitionen gesamt (in T€)	8 184 111	12 200 806
davon Maschinen (in T€/Prozent)	6 717 885 (82,1%)	11 230 717 (92,0%)
Abschreibungen (in T€)*	5 247 540	10 637 291

* Statistisches Bundesamt (2010): Kostenstrukturerhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008. (www.destatis.de); erfasst werden nur Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern.

Tab. 3-11.7 Investitionsverhalten im Maschinen- und Anlagenbau sowie im Automobilbau 2008¹¹

Mitarbeiter	Maschinen und Anlagenbau			Automobilbau		
	Unternehmen	Beschäftigte		Unternehmen	Beschäftigte	
20 - 49	1 970	36%	69.289	276	26%	9 686
50 - 99	1 491	28%	104 027	239	23%	17 078
100 - 249	1 206	22%	189 575	259	25%	41 228
250 - 499	451	8%	156 716	122	12%	43 323
500 - 999	175	3%	118 037	76	7%	52 166
1000 und mehr	126	2%	371 541	83	8%	623 473
Insgesamt	5 419	100%	1 009 185	1 055	100%	786 954

Tab. 3-11.8 Größenstrukturen im Maschinen- und Anlagenbau sowie im Automobilbau 2008¹²

¹² Statistisches Bundesamt (2010): Kostenstrukturerhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008. (www.destatis.de); erfasst werden nur Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern.

¹⁰ Statistisches Bundesamt (2010): Kostenstrukturerhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008. (www.destatis.de);

¹¹ Statistisches Bundesamt (2010): Investitionserhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008. (www.destatis.de)



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

Bezüglich der Größenstrukturen ist festzustellen, dass der Maschinen- und Anlagenbau in etwa eine mit dem Durchschnitt vergleichbare Struktur aufweist, während sich der Automobilbau davon deutlich unterscheidet: Hier haben große Mittelständler und Großunternehmen einen vergleichsweise großen Anteil an allen Unternehmen (vgl. Tab. 3-11.4 und Tab. 3-11.8).

Betrachtet man das Investitionsverhalten beider Branchen im Vergleich zum Verarbeitenden Gewerbe insgesamt, so liegt die Investitionsquote am Umsatz mit 3,5% zwar in einer ähnlichen Größenordnung (vgl. Tab. 3-11.6 und Tab.3-11.7), der Anteil der Abschreibungen an den Investitionen weist aber wieder deutliche Unterschiede zum industriellen Durchschnitt auf (~80%; vgl. Abschnitt 4.1.1): Während sie im Maschinen- und Anlagenbau nur einen Anteil von etwa 64% an den Gesamtinvestitionen erreichen und damit deutlich unterdurchschnittlich ausfallen, so liegen sie im Automobilbau mit 87% darüber. Demnach könnten die Potenziale für Erweiterungs- und Rationalisierungsinvestitionen im Maschinen- und Anlagenbau deutlich größer ausfallen als im Automobilbau. Da sich jedoch gerade diese beiden Branchen als Treiber der wirtschaftlichen Erholung in 2010 auszeichnen mit weiterhin positivem Ausblick,¹³ kann davon ausgegangen werden, dass auch der Automobilbau wieder größere Spielräume für Investitionsprojekte erhalten wird.

4.2 Ableitung des spezifischen Marktpotenzials

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf das Marktpotenzial in Deutschland.

4.2.1 Relevante Betriebe

Der hier betrachtete Serviceroboter-Anwendungsfall bezieht sich ausschließlich auf den Bereich der Produktionsassistenz in der stückgutproduzierenden Industrie, deren Produkte ausrei-

chend groß sind, genügend Montageanteile aufweisen und in Serie gefertigt werden. Der hier relevante Teilmarkt wird daher auf Grundlage der Daten des Statistischen Bundesamts sowie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) wie folgt weiter abgegrenzt (vgl. Tab. 3-11.9):¹⁴

- Statistisch relevante Sektoren sind hier der Maschinen- und Anlagenbau (WZ08-28) sowie der Automobilbau (WZ08-29).¹⁵
- Die Unternehmen müssen in der Lage sein, die für die Serviceroboter-Investitionen notwendigen, finanziellen Mittel aufzubringen. Dies erscheint erst für Unternehmen mit einer Größe von mindestens 100 Mitarbeitern plausibel.¹⁶ Dies trifft im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus für 1 958 Unternehmen zu - im Bereich des Automobilbaus für 540.¹⁷
- Es werden nur solche Unternehmen betrachtet, die mittelkomplexe bis komplexe Produkte in einer Serienproduktion fertigen. Dies trifft im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus für ~43% der Unternehmen zu – im Bereich des Automobilbaus für ~79%.¹⁸
- Weiterhin wird geschätzt, dass die Produkte von nur jeweils

¹⁴ Statistisches Bundesamt (2010): *Kostenstrukturerhebung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe 2008*. (www.destatis.de); erfasst werden nur Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern; Fraunhofer ISI (2010): „Modernisierung der Produktion“. Datenmaterial aus der Erhebung 2006. (http://isi.fraunhofer.de/isi-del/ilprojekte/erhebung_pi.php)

¹⁵ Prinzipiell könnten auch noch weitere Branchen der stückgutproduzierenden Industrie in die Betrachtung integriert werden - bei den beiden hier betrachteten handelt es sich aber um die wichtigsten für dieses SR-Anwendungsszenario. Vgl. Abschnitt 4.1.2.

¹⁶ Schätzung. Voraussetzung für eine SR-Investition ist eine ausreichende Finanzierungsfähigkeit der hier betrachteten Unternehmen. Bei der hier betrachteten SR-Investition sind Mittel von mindestens 1000 Tsd Euro notwendig. Zwar stellt die Beschaffung von Maschinen und Anlagen den Schwerpunkt der Investitionstätigkeiten dar, dennoch wird angenommen, dass nicht mehr als ein Viertel der gesamten Finanzmittel für SR-Investitionen verwendet werden. Aus Tab. 3-11.6 und Tab. 3-11.7 ergeben sich durchschnittliche Investitionen in Maschinen und Anlagen von ~10 Tsd Euro pro Beschäftigten. Auf dieser Grundlage würden die finanziellen Aufwendungen für einen SR erst für Unternehmen mit mindestens 100 Mitarbeitern in eine diesem Anteil entsprechende Größenordnung fallen (100*10 Tsd Euro = 1 000 Tsd Euro)

¹⁷ Vgl. Tab. 3-11.9

¹⁸ Schätzung. Datenmaterial des Fraunhofer ISI.

¹³ Vgl. BDI (2010): *Konjunktur-Report. Ausgabe 04, 21.10.2010*. (www.bdi.eu)



PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 4 MARKTDATEN

10% dieser Unternehmen einen Montageprozess haben, der mindestens 2 Personen benötigt und einen signifikanten Anteil an der Gesamtprozesszeit hat.

Unternehmen Verarbeitendes Gewerbe	36 287
davon Maschinen- und Anlagenbau	5 418
davon Automobilbau	1 054

davon >100 Beschäftigte	
• Maschinen- und Anlagenbau	1 958
• Automobilbau	540

davon Serienproduktion und mittelkomplexe bis komplexe Produkte	
• Maschinen- und Anlagenbau	842
• Automobilbau	427

davon mit Montageprozess für zwei Personen	
• Maschinen- und Anlagenbau	84
• Automobilbau	43

Tab. 3-11.9 Ableitung des relevanten Zielmarkts

4.2.2 Marktpotenzial

Insgesamt kommen demnach 127 Unternehmen aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus bzw. aus dem Automobilbau als potenzielle Käufer für das hier beschriebene Serviceroboter-Anwendungsszenario in Frage. Das daraus resultierende Marktpotenzial wird daher wie folgt abgeschätzt (vgl. Tab. 3-11.10):

- Für die diesen Betrieben zur Verfügung stehende Investitionssumme sind keine statistischen Daten unmittelbar verfügbar. Aus den Daten des Statistischen Bundesamts ergeben sich jedoch durchschnittliche Investitionen von ca. 10 Tsd Euro pro Beschäftigten in Maschinen und Anlagen.¹⁹ Die hier betrachteten Unternehmen beschäftigen schätzungsweise 95 997 Mitarbeiter in den betroffenen Unternehmensteilen²⁰, so dass hier eine Gesamtinvestitionssumme für Maschinen und Anlagen von 960,0 Mio Euro angesetzt wird.
- Es wird geschätzt, dass davon wiederum bis zu 25%

¹⁹ Vgl. Abb. 19 und Abb. 21.

²⁰ Schätzung. Vgl. für Beschäftigung in Unternehmen mit mehr als 100 Abb. 20; davon fallen jeweils 43% bzw. 79% in die hier relevante Zielgruppe bzw. in die betroffenen Unternehmensteile (vgl. Abschnitt 4.2.1).

für Serviceroboter-Investitionen zur Verfügung stehen könnten (~240,0 Mio Euro).²¹

- Der Preis der hier betrachteten Serviceroboter liegt bei 265,7 / 178,6 Tsd Euro (SR-Variante A/B)²². Dies könnte rechnerisch zu einem jährlichen Absatzpotenzial von 903 / 1 344 Servicerobotern führen – was letztlich zu einer Installed Base von 7 226 / 10 750 Serviceroboter im „eingeschwungenen“ Marktzustand führen würde (Lebensdauer 8 Jahre).
- Demnach würden auf 10 000 Beschäftigte ca. 40 / 60 Serviceroboter in den Unternehmen kommen. Dies ist vor dem Hintergrund der entsprechenden Quote für konventionelle Industrieroboter (IR), die in Deutschland 2008 bei etwa 230 IR pro 10 000 Beschäftigten lag²³, plausibel.
- Aufgrund der positiven LCC-Betrachtung (vgl. Abschnitt 3.1) sind keine weiteren Abschlüsse auf das errechnete Marktpotenzial vorzunehmen. Es kann damit gerechnet werden, dass das Potenzial langfristig voll ausgenutzt werden könnte.

Relevante Betriebe	~1 249
Brutto Investitionssumme (T€)	~10 886 105,1
davon Maschinen u. Anlagen (T€)	~ 959 973,8
davon SR Potenzial (T€)	~ 239 993,4

Marktpotenzial SR (#SR/Jahr; SR 265,7 / 178,6 T€ Variante A/B SR pro System)	
errechnet	~903 / 1 344
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~903 / 1 344

Errechneter max. Bestand an SR (8 Jahre Lebensdauer eines Systems)	
errechnet	~7 226 / 10 750
real (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit)	~7 226 / 10 750

Tab. 3-11.10 Ableitung des Marktpotenzials (eigene Schätzungen)

²¹ Ermangelung geeigneter Daten. Da die SR Lösungen keine bestehenden Geräte ersetzen und damit einen zusätzlichen Investitionsbedarf auslösen, der mit anderen Investitionsprojekten konkurriert, wird ein niedriger Anteil angesetzt. Aus Abschnitt 4.1 geht hervor, dass der Anteil von Rationalisierungs- und Erweiterungsinvestitionen zwischen 40% und 20% liegen könnte.

²² Im Folgenden werden zur Vereinfachung der Abschätzung nur die Kosten der Serviceroboter betrachtet und die Infrastrukturkosten vernachlässigt.

²³ Vgl. www.worldrobotics.org.



01

02

03

04

05

06

07

08

09

10



11

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 5 FAZIT

5 Fazit

5.1 Wirtschaftlichkeit

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die konzipierten Serviceroboter-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zur manuellen Durchführung darstellen: Zum einen sind sie aus der Perspektive der Stückkosten deutlich günstiger als die manuelle Alternative. Zum anderen liegt die Amortisationsdauer mit 4 Jahren in einem Bereich, der durchaus akzeptabel für einen Automobilhersteller sein könnte.
- Vor diesem Hintergrund kann mit einer hohen Marktakzeptanz der Serviceroboter gerechnet werden. Als Risiko bleibt alleine die Annahme bestehen, dass die Serviceroboter-Varianten tatsächlich einen mit der manuellen Alternative vergleichbaren, nominalen Durchsatz erreichen. Auch bleibt einschränkend zu erwähnen, dass das hier errechnete Marktpotenzial von insgesamt bis zu 1 344 Serviceroboter pro Jahr erhebliche Mittel zur Finanzierung der Investitionen voraussetzen würde, welche damit stark die Finanzierungsfähigkeit anderer wichtiger Projekte auf Kundenseite einschränken würde. Das Marktpotenzial muss daher als langfristig verstanden werden.

5.2 Forschungsbedarf

- Entwicklung von Bildverarbeitungs-komponenten zur sicheren Lokalisierung und Identifikation von Objekten unterschiedlichster Ausprägung
 - Bisher müssen Bauteile für die Bildverarbeitung objektspezifisch programmiert werden. Für eine flexible Erkennung ist die Umsetzung von gegebenen CAD-Daten in ein Erkennungsschema für die Bildverarbeitung notwendig, um so eine einfache und wirtschaftlich sinnvolle Anwendung zu realisieren. Dazu ist die Entwicklung eines standardisierten Austauschformats (analog STEP oder IGES) nötig, welches die äußere Kontur sowie die zugehörigen Materialeigenschaften beinhaltet.
 - Bildverarbeitungssysteme müssen Bauteile auf Basis des CAD-Austauschformats in unterschiedlichsten Ausprägungen, wie z.B. Farbe, Oberflächenbeschaffenheit und Sonderformen, schnell und sicher erkennen und unterscheiden können.
- Die Bildverarbeitung muss in Folge der Roboterbewegungen unter unterschiedlichen Lichtverhältnissen sicher und stabil funktionieren.
- Entwicklung neuartiger Roboterlösungen
 - Für den flexiblen Einsatz werden Roboterarme mit exzellentem Eigengewicht-Nutzlast-Verhältnis benötigt.
 - Die Roboter benötigen integrierte Sensoriken für die haptische Feinpositionierung von Objekten, z.B. das Finden einer Einrastkontur mit Hilfe von Kraft- oder Momentensprüngen.
 - Es werden flexible Greif- und Montagesysteme benötigt, mit denen ein weites Spektrum von Objekten gegriffen werden kann. Dazu sind flexible Mehrfingergreifer und der schnelle Werkzeugwechsel mit Hilfe von Plug-and-Play-Komponenten erforderlich.
- Sichere Interaktion von Roboter und Mensch
 - Es werden Sicherheitssensoren benötigt, die eine Kollision des Roboters mit dem Menschen sicher erkennen und Gefahren für den Werker ausschließen können.
 - Es müssen neue Normen und Richtlinien für die sichere Zusammenarbeit von Mensch und Roboter definiert werden, die eine planbare, zertifizierte Realisierung solcher Systeme ermöglichen.
- Neue Kommunikationsmethoden für die interaktive Steuerung von Robotern
 - Es wird eine bidirektionale, sprachbasierte Kommunikation benötigt, die Fehlbedienung verhindert und Handlungsanweisungen interaktiv ermöglicht.
 - Die Kommunikation muss die Erkennung von Gesten und Bewegungen des Werkers unterstützen, um so Handlungsanweisungen, wie z.B. Positionsvorgaben oder aktuelle Arbeitsbereiche korrekt interpretieren zu können. Hierbei wird durch die Gestenerkennung eine Eingrenzung des durch die Bildverarbeitung zu betrachtenden Bereichs erzielt, um die Auffindung des Montageobjekts zu ermöglichen.





01

02

03

04

05

06

07

08

09

10



11

PRODUKTIONSASSISTENZ

→ 6 ANHANG

6 Anhang

Anschaffungskosten Hardware	SR-Variante A	SR-Variante B (mit IR)
Kameras für Positions-/ Sicherheitsfunktionen	7 500 € x 4 = 30 000 €	7 500 € x 4 = 30 000 €
Kamera zur Objekterkennung	2 000 €	2 000 €
Plug-&-Work-Werkzeug	10 000 €	10 000 €
Zukünftiger Leichtbauroboter- arm inkl. F-M-Sensorik für 25 kg	150 000 €	-
Aktueller Leichtbauroboterarm mit 7 DOF ohne F-M-Sensorik für 25 kg	-	75 000 €
Kraft-Momenten-Sensor	-	7 500 €
Akustisches Interface, WLAN, Basisverbinder, Steuerungs-PC	1 900 €	1 900 €
Batteriepack, Ladestation	5 500 €	5 500 €
Basisstruktur	5 000 €	5 000 €
Schnittstelle SR zu IR	-	500 €
Summe für 1 SR plus 1 IR bei Variante B	204,4 T€	137,4 T€ 60 T€ IR (1 IR pro 6 SR)
Summe Gesamtsystem (6 SR)	1 226,4 T€	884,4 T€

Tab. 3-11.11 Anschaffungskosten Hardware





SZENARIOÜBERGREIFENDE ZUSAMMENFASSUNG UND IMPLIKATIONEN

Die in dieser Studie entwickelten Serviceroboter-Konzepte unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander, nicht nur hinsichtlich der ihnen zugrunde liegenden technischen Ausführung, sondern auch und insbesondere hinsichtlich ihrer betriebswirtschaftlichen Bewertung. Diese Heterogenität ist typisch für die Vielzahl existierender und vorgeschlagener Serviceroboter-Anwendungen, wobei alle Serviceroboter-Konzepte dieser Studie nach der vorgestellten Methode und unter Nutzung eines gemeinsamen Komponenten-Katalogs (in Bezug auf mechatronische Elemente und Software-Komponenten) erstellt wurden.

Ziel dieses Kapitels ist die Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse aus den ausgeführten beispielhaften Szenarien. Hierzu sollen anwendungsübergreifende Schlüsseltechnologien, Wirtschaftlichkeits- und Marktpotenziale sowie die Erschließung möglicher kostenreduzierender Faktoren identifiziert werden. Mögliche Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen mit großer Hebelwirkung für die Erschließung der Serviceroboter-Zukunftsmärkte sollen begründet und als Handlungsempfehlungen für das Bundesministerium für Bildung und Forschung formuliert werden.

Eine abschließende und zusammenfassende Bewertung des aktuellen Stands der Servicerobotik erfordert eine knappe, vergleichende Darstellung der Fazits aus den 11 vorgestellten Szenariensteckbriefen aus betriebswirtschaftlicher (Kapitel 4.1) wie auch aus technischer Perspektive (Kapitel 4.2):

- Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive:
 - geschätzte Absatz- und Marktpotenziale der betrachteten Serviceroboter-Szenarien,
 - Amortisationszeiträume der automatisierten Leistungsverrichtung (Serviceroboter-Lösung),
 - Nutzwerte,
 - mögliche Hebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit z.B. durch die Nutzung von Economy of Scale-Effekten.
- Aus technischer Perspektive:
 - Sicherheitstechnische Bewertung der Serviceroboter-Szenarien,
 - Kosten der Software-Entwicklung und die Auswirkung von Modularität bzw. Wiederverwendbarkeit von Software-Komponenten sowie
 - die Verfügbarkeit und Bewertung mechatronischer Schlüsselkomponenten.

BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 1 ÜBERSICHT ZU DEN MARKTPOTENZIALEN

1 Übersicht zu den Marktpotenzialen

Der folgende Abschnitt bezieht sich dabei auf die für die Beurteilung der Marktpotenziale relevanten Teile der Szenariensteckbriefe, d.h. auf die LCC-Analyse (Steckbrief-Kap. 3), die darauf aufbauende Abschätzung der Marktpotenziale pro Jahr (Steckbrief-Kapitel 4) sowie deren szenariospezifische Beurteilung (Steckbrief-Kapitel 5). Tabelle 4-1.1 stellt dazu die wesentlichen Ergebnisse in einer vergleichenden Übersicht dar. Eine Serie von Kreisdiagrammen ergänzt diese mit szenariospezifischen Details aus der LCC-Analyse und spezifischen Anmerkungen zur Beurteilung der Ergebnisse. Im Folgenden ist zu beachten:

- Die jeweiligen Details, Berechnungsmethodik sowie Argumentationslinien finden sich in den Szenariensteckbriefen.
- In Bezug auf die nachfolgenden Kreisdiagramme und Erklärungen ist zu beachten, dass der Übersicht wegen für jedes Serviceroboter-Anwendungsszenario nur jeweils eine der erarbeiteten Serviceroboter-Varianten mit der konventionellen (manuellen) Leistungserbringung verglichen wird. Dies ist vertretbar, da sich die LCC-Kostenstrukturen der Serviceroboter-Varianten zumeist ähneln und damit

„repräsentativ“ für ein Serviceroboter-Szenario sind.

- Weiterhin beziehen sich die jährlichen Marktpotenziale nur auf die in den Steckbriefen eng abgegrenzten Szenarien sowie nur auf den bundesdeutschen Wirtschaftsraum.
- Die Marktpotenzialabschätzungen sind als untere Grenze zu verstehen!
- Letztlich ist zu beachten, dass sämtliche Einschätzungen zur Wirtschaftlichkeit und zu den Marktpotenzialen sehr stark vom gegebenen Anwendungskontext der Serviceroboter abhängen, was insbesondere für die hier durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis der Lebenszykluskosten gilt.

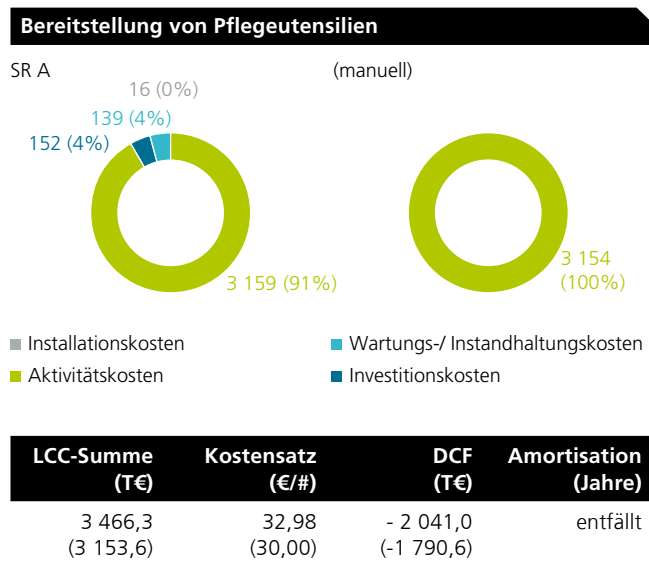
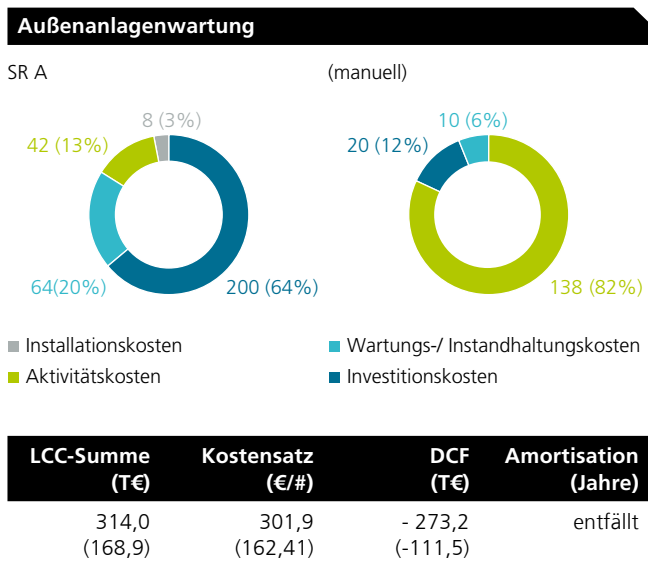
Die hier betrachteten Serviceroboter-Anwendungsszenarien werden zwar als repräsentativ betrachtet – die durchgeführten Berechnungen entbinden die Praxis jedoch keinesfalls von einer einzelfallspezifischen Bewertung. Diese kann dabei durchaus zu einem anderen Ergebnis in dieser Hinsicht gelangen. Hierbei kann das vorgestellte SR-LCC Tool Hilfestellung leisten, welches genau zu diesem Zweck entwickelt wurde.

Serviceroboter-Anwendungsszenario	Wirtschaftlichkeit		Marktpotenzialabschätzung in SR p.a.		Anmerkung zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit / Marktpotenzialausschöpfung
	basierend auf LCC	Relevanz qualitativer Faktoren	errechnetes Maximum	realistische Ausschöpfung	
Außenanlagenwartung	(nein)	hoch	391	39	Markt sehr eng abgegrenzt; Potenzial stark vom definierten SR-Aufgabenspektrum abhängig.
Bereitstellung von Pflegeutensilien	(nein)	hoch	5 – 10	2 – 5	-
Bewegen von Personen	nein	hoch	6	0	-
Bodenfrüchteernte	hoch	gering	36 – 84	36 – 84	-
Bodenreinigung	nein	gering	25 – 44	0	Technische Verfügbarkeit und Anschaffungskosten als Hebel zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.
Containertransport im Krankenhaus	hoch	hoch	40 – 60	40 – 60	-
Fassadenreinigung	nein	keine	3	0	Reduzierung der Anwendungskomplexität als Hebel zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.
Innenausbauassistenz	hoch	hoch	5 – 6	5 – 6	Markt sehr eng abgegrenzt; Potenzial bei erweitertem SR-Anwendungsspektrum wesentlich höher.
Kanalinspektion	hoch	hoch	30 – 59	30 – 59	Zur Ausschöpfung des Marktpotenzials sind ggf. andere Geschäftsmodelle / Wirtschaftsstrukturen notwendig.
Milchviehwirtschaft	hoch	hoch	62	62	-
Produktionsassistenz	hoch	gering	903 – 1 344	903 – 1 344	Die hohen Absatzzahlen werden erst langfristig erreicht (vgl. Diffusion von Industrierobotern).

Tab. 4-1.1 Serviceroboter-Szenariensteckbriefe: Übersichtstabelle zu den geschätzten Marktpotenzialen

BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 1 ÜBERSICHT ZU DEN MARKTPOTENZIALEN



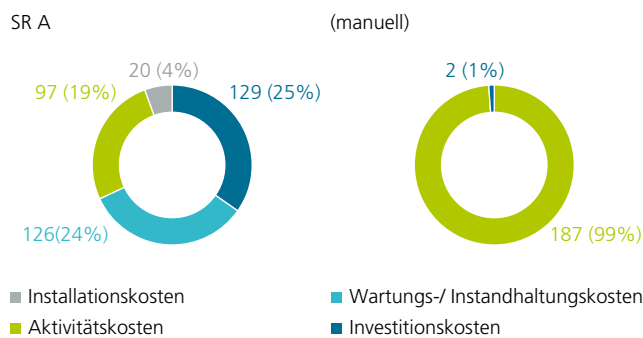
- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht wirtschaftlich – allerdings nur bei enger Definition des Anwendungsbereichs.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan nur 39 Serviceroboter p.a. (10% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von maximal 391 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Das Serviceroboter-Konzept ist eigentlich nicht mit der manuellen Lösung vergleichbar, da diese Serviceroboter-Konzepte ganz neue Anwendungsmöglichkeiten und damit Mehrwerte für den Kunden mit sich bringen. Werden diese genutzt, so sind die Serviceroboter-Konzepte als wirtschaftlich einzuschätzen.
 - Auch ist der Markt im betrachteten Szenario sehr eng abgegrenzt (hier nur Energie- und Wasserversorger). Weitere Anwendungsgebiete und damit Marktpotenziale würden z.B. auch große Industrieanlagen wie in der Chemie oder in der Logistik (Umschlags- oder Lagerareale) bieten.
 - Mögliche Hebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit: Erhöhung des Auslastungsgrads.

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht wirtschaftlich. Dies gilt allerdings nur, wenn die Entlastung des Personals nicht mit kalkulatorischen Kosten angesetzt wird – in diesem Fall wären die vorgeschlagenen SR-Varianten mit der manuellen Alternative vergleichbar.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan nur 2 bis 5 Serviceroboter p.a. je nach Variante (50% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von maximal 5 bis 10 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Die Serviceroboter-Konzepte führen zu einer hohen Entlastung bei vergleichsweise geringem Kostenanstieg, was vor dem Hintergrund des demografischen Wandels und Fachkräftemangels sehr attraktiv sein könnte. Voraussetzungen: (1) Kosten müssen durch die Träger der Pflegeheime auf das Gesundheitssystem umlegbar sein; (2) Finanzierungsfähigkeit muss sichergestellt sein, was gerade für öffentliche Pflegeheime schwierig sein könnte.
 - Mögliche Hebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit: keine. Jedoch sind die qualitativen Nutzensvorteile (z.B. Personalentlastung) von Fall zu Fall zu überprüfen und gegebenenfalls bei der Entscheidung durch eine geeignete Methode zu berücksichtigen.

BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

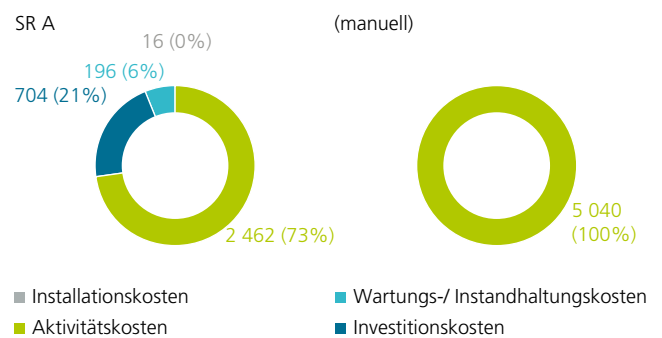
→ 1 ÜBERSICHT ZU DEN MARKTPOTENZIALEN

Bewegen von Personen in der Pflege



LCC-Summe (T€)	Kostensatz (€/#)	DCF (T€)	Amortisation (Jahre)
371,5 (189,2)	27,56 (15,16)	- 275,4 (-108,3)	entfällt

Bodenfrüchteernte



LCC-Summe (T€)	Kostensatz (€/#)	DCF (T€)	Amortisation (Jahre)
3.378,5 (5 040,0)	0,04 (0,04)	-2 735,6 (-3 821,1)	< 3

- Konzipierte Lösung i.A. für einzelne Station allein nicht wirtschaftlich. Aufgrund hoher Produktivitätsvorteile bei geringer Auslastung ist dies aber im Einzelfall zu prüfen.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 0 Service-roboter p.a. je nach Variante (0% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von max. 6 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Lösung führt zu hoher Produktivitätssteigerung (~20%), dennoch würden bei Vollauslastung die Leistungskosten noch über denen der manuellen Erbringung liegen.
 - Nur bei drastischem Lohnkostenanstieg (>100% Steigerung), z.B. aufgrund Fachkräftemangel, könnte SR-Variante B günstiger als die manuelle Alternative sein. Voraussetzungen: (1) Kosten sind durch Pflegeheimträger auf das Gesundheitssystem umlegbar; (2) Sicherstellung Finanzierungsfähigkeit – dies könnte für öffentliche Pflegeheime schwierig sein.
 - Mögliche Hebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit: keine (50%-Reduzierung der Anschaffungskosten ist bereits durch SR-Variante B abgebildet). Jedoch sind qualitative Nutzensvorteile (z.B. Personalentlastung) fallweise zu überprüfen und zu berücksichtigen.

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wirtschaftlich. Die Amortisationsdauer liegt bei SR-Variante B sogar bei knapp einem Jahr unter Maßgabe der Szenario-Parameter.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 36 bis 84 Serviceroboter p.a. je nach Variante (100% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von 36 bis maximal 84 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zum konventionellen Gemüseanbau darstellen (geringere Stückkosten, besseres finanzwirtschaftliches Ergebnis, sehr kurze Amortisationszeiträume).
 - Zusätzlich erscheinen die SR-Varianten hinsichtlich sich ändernder Rahmenbedingungen robuster als die konventionelle Methode – insbesondere vor dem Hintergrund der zu erwartenden Lohnkostensteigerungen (Mindestlöhne) bzw. der zunehmend schwierigeren Verfügbarkeit von Erntehelfern.

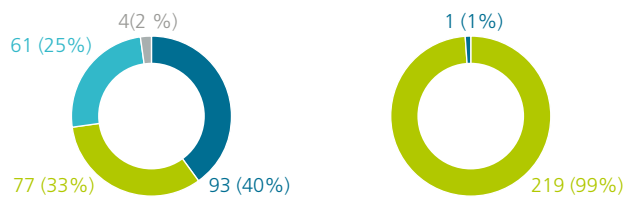
BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 1 ÜBERSICHT ZU DEN MARKTPOTENZIALEN

Bodenreinigung

SR A

(manuell)



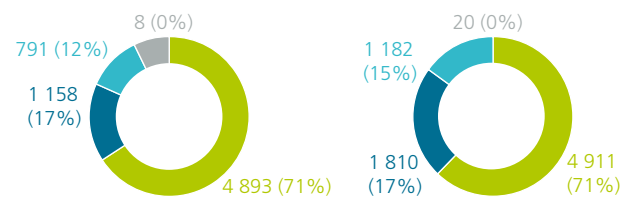
■ Installationskosten ■ Wartungs-/ Instandhaltungskosten
 ■ Aktivitätskosten ■ Investitionskosten

LCC-Summe (T€)	Kostensatz (€/#)	DCF (T€)	Amortisation (Jahre)
234,9 (220,4)	21,51 (15,13)	- 193,0 (-153,6)	entfällt

Containertransport im Krankenhaus

SR A

(FTS)



■ Installationskosten ■ Wartungs-/ Instandhaltungskosten
 ■ Aktivitätskosten ■ Investitionskosten

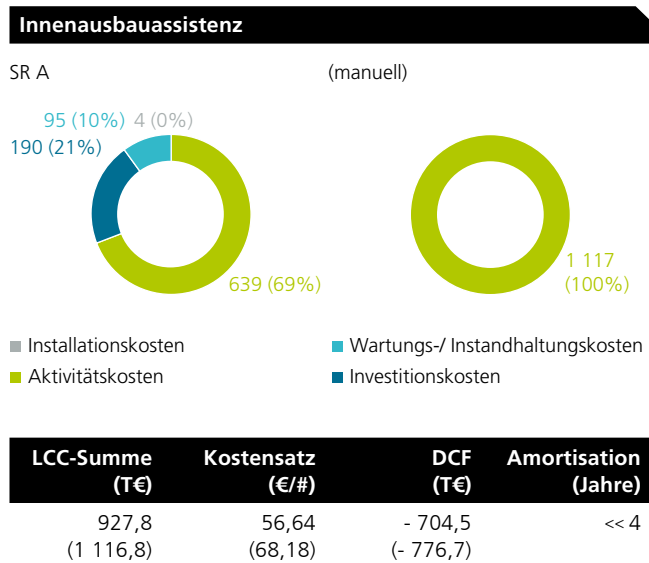
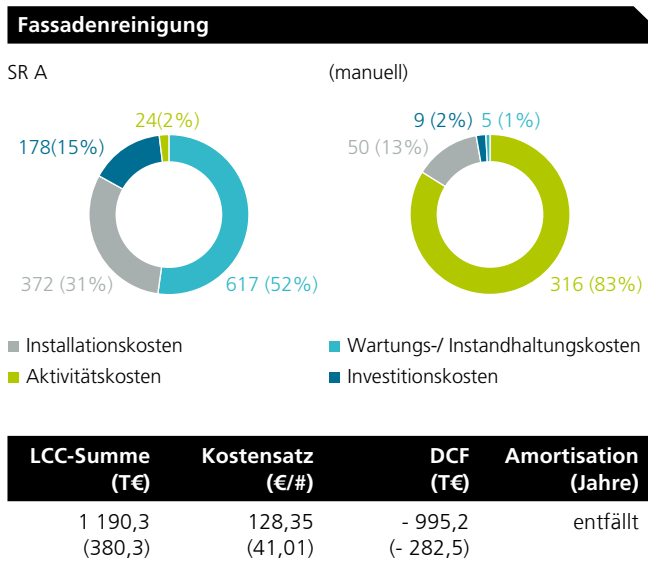
LCC-Summe (T€)	Kostensatz (€/#)	DCF (T€)	Amortisation (Jahre)
6 850,3 (7 922,6)	2,23 (2,58)	- 4 393,7 (- 5 289,4)	hier nicht relevant

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht wirtschaftlich.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 0 Service-roboter p.a. (0% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von 25 bis 44 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass höchstens die SR-Variante A eine wirtschaftliche Alternative zur manuellen Erbringung darstellen könnte – allerdings unter den Einschränkungen, dass
 - sich die Lohnentwicklung aus Sicht der Reinigungsunternehmen tatsächlich so negativ darstellt wie hier angenommen (branchenweiter Mindestlohn)
 - beide betrachtete Varianten A und B eine vergleichbare Arbeitsleistung bereitstellen (Vollauslastung; quasi 100% Verfügbarkeit)
 - die Anschaffungskosten signifikant (deutlich unter 50%) sinken.
 - Mögliche Hebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit: Ggf. zu realisierende Skaleneffekte, wenn diese die Anschaffungskosten halbieren würden. Dies ist als langfristig durchaus machbare Herausforderung zu bewerten.

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wirtschaftlich.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 40 bis 60 Serviceroboter p.a. je nach Variante (100% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von maximal 40 bis 60 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zum konventionellen FTS darstellen.
 - Einschränkend ist jedoch zu erwähnen, dass das hier beschriebene Anwendungsszenario nur für Krankenhäuser eine im Vergleich zum FTS günstigere Alternative ist, in welchen der Leistungsbedarf von 700 zu bewegenden Containern pro Tag nicht überschritten wird. In anderen Fällen mit einem wesentlich höheren Bedarf an Transportleistung könnte das konventionelle FTS weiterhin die einzige, technisch machbare Automatisierungslösung darstellen (insbesondere weil heutige SR-Varianten in der Regel nach nicht die gleiche Transportleistung erbringen können).

BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 1 ÜBERSICHT ZU DEN MARKTPOTENZIALEN



- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht wirtschaftlich.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 0 Serviceroboter p.a. (0% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von maximal 3 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht keine ernstzunehmende Alternative zur üblichen Leistungserbringung durch Industrie-Kletterer darstellen. Erst bei einer Fassadengröße in der Dimension großer Hochhäuser könnte sie eine nennenswerte Alternative darstellen.
 - Ein Potenzial könnte sich ggf. als Nischenprodukt und bei alternativen Kundenbeziehungen bzw. Geschäftsmodellen der Hersteller ergeben.
 - Mögliche Hebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit: Reduzierung der Systemkomplexität um eine höhere, effektive Produktivitätszeit der Anlage zu erreichen; z.B. durch rasche Konfiguration und Inbetriebnahme (ggf. durch Gebäude-seitige Installationen wie Montagepunkte für die Winden oder Aktivierung bestehender Programme), um die Produktivität des Serviceroboter-Systems im Schnitt zu erhöhen.

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wirtschaftlich.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 5 bis 6 Serviceroboter p.a. (100% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von 5 bis 6 Servicerobotern p.a.).
- **Fazit:**
 - Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zur konventionellen Leistungserbringung bieten.
 - Darüber hinaus haben die SR-Varianten noch den in dieser Branche überaus wichtigen Mehrwert, die Arbeiter bei einer körperlich belastenden Tätigkeit zu unterstützen – was vor dem Hintergrund des demografischen Wandels von zusätzlichem Interesse sein dürfte (Reduzierung des Krankheitsrisikos, Potenziale zur Beschäftigung älterer Arbeitnehmer).
 - Auch ist der Markt hier sehr eng abgegrenzt: Betrachtet wurde nur die Assistentz bei der Montage von Trockenbauplatten. Erhebliche Anwendungspotenziale könnten sich auch bei weiteren Tätigkeiten im Bereich des Innenausbaus ergeben (z.B. Fliesenlegen, Malerarbeiten, Arbeiten im Umfeld von Gas / Wasser etc.), so dass das Marktpotenzial als untere Grenze zu verstehen ist.

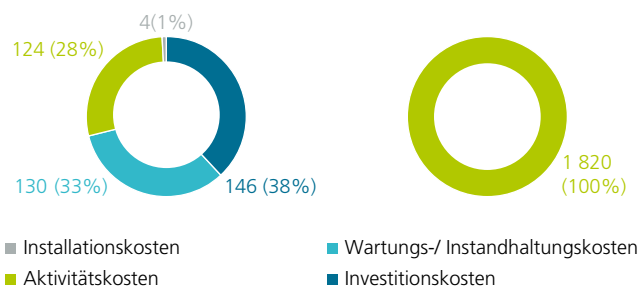
BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 1 ÜBERSICHT ZU DEN MARKTPOTENZIALEN

Kanalinspektion

SR A

(manuell)



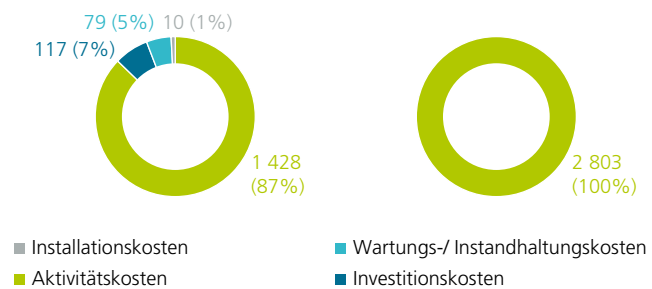
■ Installationskosten ■ Wartungs-/ Instandhaltungskosten
 ■ Aktivitätskosten ■ Investitionskosten

LCC-Summe (T€)	Kostensatz (€/#)	DCF (T€)	Amortisation (Jahre)
404,5 (1 820)	0,22 (1,00)	- 327,0 (- 1 265,8)	<< 1

Milchviehhaltung

SR A

(manuell)



■ Installationskosten ■ Wartungs-/ Instandhaltungskosten
 ■ Aktivitätskosten ■ Investitionskosten

LCC-Summe (T€)	Kostensatz (€/#)	DCF (T€)	Amortisation (Jahre)
1 633,4 (2 803,2)	0,23 (0,32)	- 1 131,4 (- 1 869,4)	<< 2

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wirtschaftlich.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 30 bis 59 Serviceroboter p.a. je nach Variante (100% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von 30 bis maximal 59 Servicerobotern p.a.).

• **Fazit:**

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten in wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative, insbesondere aufgrund der schnellen Amortisation, zur aktuell üblichen Fremdvergabe der Inspektionsleistung für die Stadtwerke (Kanalbetreiber) darstellen.
- Dies könnte allerdings zunächst neue Marktstrukturen und Geschäftsmodelle bedingen („Insourcing“ der Kanalinspektion durch Kanalbetreiber).

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wirtschaftlich.
- Geschätztes Absatzpotenzial daher momentan 62 Serviceroboter p.a. je nach Variante (100% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von maximal 30 bis 62 Servicerobotern p.a.).

• **Fazit:**

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass der hier betrachtete Anwendungsfall zwar nur für eine kleine Anzahl von Betrieben relevant ist (~ 250 Betriebe) – es sich aber für diese in jeder Hinsicht wirtschaftlich im Vergleich zur konventionellen Lösung darstellt.
- Bemerkenswert ist zudem, dass sich die dargestellte SR-Variante A selbst in einem verkürzten Zwei-Schicht-Betrieb mit einer dementsprechend verringerten, absoluten Melkleistung rechnen würde, d.h. insbesondere auch in Betrieben mit deutlich weniger als 1 000 Milchkühen (was heute im Allgemeinen als untere Grenze für die Anwendung eines Melkkarussells gilt).

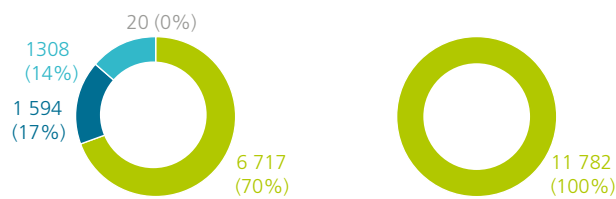
BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 1 ÜBERSICHT ZU DEN MARKTPOTENZIALEN

Produktionsassistenz

SR A

(manuell)



■ Installationskosten ■ Wartungs-/ Instandhaltungskosten
 ■ Aktivitätskosten ■ Investitionskosten

LCC-Summe (T€)	Kostensatz (€/#)	DCF (T€)	Amortisation (Jahre)
9 638,8 (11 781,8)	55,78 (64,59)	- 6 965,5 (- 7 856,9)	- 4

- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht Wirtschaftlichkeit – SR-Variante B sogar mit einer Amortisationszeit von deutlich unter drei Jahren. Geschätztes Absatzpotenzial daher langfristig 903 bis 1 344 Serviceroboter p.a. je nach Variante (100% Ausnutzungsgrad des Marktpotenzials von maximal 903 bis 1 344 Servicerobotern p.a.).

• **Fazit:**

- Die LCC-Betrachtungen haben deutlich gezeigt, dass die SR-Varianten aus wirtschaftlicher Sicht eine ernstzunehmende Alternative zur manuellen Leistungserbringung darstellen. Sie sind insbesondere bezogen auf die Stückkosten deutlich günstiger als die manuelle Alternative.
- Die Quote von SR pro 10 000 Beschäftigte würde bei der hier angenommenen Verbreitung bei diesen Assistenzrobotern bei 40 bis 61 liegen (zum Vergleich: Im Bereich der Industrieroboter liegt diese Quote heute bei ca. 230).
- Aufgrund der hohen, errechneten Absatzzahl wird dieses Niveau erst langfristig erreicht werden – in einem mit der Diffusion von konventionellen Industrierobotern vergleichbaren Prozess (ca. 10 bis 15 Jahre).

BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 2 ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG DER MARKTPOTENZIALANALYSE

2 Zusammenfassende Beurteilung der Marktpotenzialanalyse

Auf Grundlage der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Analysen zur Abschätzung und Beurteilung der Marktpotenziale lassen sich generell folgende Kernbotschaften festhalten – insbesondere bzgl. solcher Serviceroboter-Konzepte, für die aufgrund der betriebswirtschaftlichen Bewertung momentan mit keiner nennenswerten Ausnutzung des Marktpotenzial gerechnet werden kann:

Eine Reduzierung der Anschaffungskosten ist in der Regel nicht der vorrangige Hebel zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit eines Serviceroboter-Konzepts.

- Nur in wenigen der betrachteten Serviceroboter-Szenarien sind die Anschaffungskosten der wesentliche LCC-Kostenstreiber – ihr Anteil an den gesamten LCC-Kosten liegt in der Regel unter 25%.
- Ausnahmen finden sich in den Szenarien „Kanalinspektion“, „Außenanlagenwartung“ und „Bodenreinigung“. Dabei ist anzumerken, dass der erste Fall trotzdem schon wirtschaftlich ist und dies beim zweiten bei einer Erweiterung des momentan eng begrenzten Tätigkeitsbereichs für die Zukunft erwartet werden kann. Einzig im Fall der „Bodenreinigung“ könnte eine rechnerische Reduktion der Anschaffungskosten um 50% die Wirtschaftlichkeitsrelation umkehren.¹
- Oftmals wird in diesem Zusammenhang angeführt, dass sog. „Skaleneffekte“ die skizzierte Anschaffungskosten-Problematik beheben könnten. Die Ergebnisse dieser Studie legen diesbezüglich nahe, dass die dafür notwendigen Reduktionen in Größenordnungen liegen (weit mehr als 50%), die sich zumindest kurzfristig nicht plausibel mit Skaleneffekten begründen lassen. Zudem müssten diese Effekte durch die Hersteller vollständig an die potenziellen Kunden weitergegeben werden, was in einem so konzentrierten Markt auf Herstellerseite ebenso wenig plausibel erscheint.

- Umgekehrt folgt, dass eine Reduzierung der Aktivitätskosten einen ggf. einfacher zu realisierenden Hebel zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeitsrelation bietet – insbesondere wenn das Anwendungsszenario hohe Vorbereitungs- und Betreuungsaufwände ausweist und die Anwendungskomplexität reduziert werden könnte. Als Beispiel kann hier das Szenario „Fassadenreinigung“ dienen.

Eine Entscheidungsrelevanz qualitativer Zusatznutzen kann bei deutlich negativer Wirtschaftlichkeitsrelation nicht festgestellt werden.

- In einigen der Serviceroboter-Szenarien konnten erhebliche, aber nur schwer monetär zu bewertende Zusatznutzen festgestellt werden (z. B. durch Arbeiterleichterungen/Entlastung der Personals). Die in dieser Studie durchgeführten Marktstrukturanalysen sowie Experteninterviews haben jedoch gezeigt, dass die Marktgegebenheiten in den betrachteten Zielmärkten in der Regel zumindest eine vergleichbare Kostenposition bzw. finanzielle Rahmenbedingungen erfordern. In allen untersuchten Märkten ist die Wirtschaftlichkeit damit das primäre Entscheidungskriterium.
- Folglich können qualitative Faktoren eine schlechte Wirtschaftlichkeitsrelation nicht vollständig kippen. Eine Ausnahme könnten in diesem Zusammenhang stark reglementierte Märkte wie der Bereich der „Pflege“ darstellen, in denen zusätzliche Kosten auf andere Trägerschaften wie z.B. die Träger der Pflege- und Krankenversicherung, übertragen werden können. Aber auch hier gilt, dass es keine im Vergleich zur SR-Variante praktikable und kostengünstigere Alternative geben darf bzw. die SR-Variante müsste die beste unter den ungünstigsten Alternativen sein. Ein Beispiel dafür könnte das Szenario „Bereitstellung von Pflegeutensilien“ darstellen, sollte sich die Situation auf dem Pflegefachkräfte-Arbeitsmarkt weiterhin nicht merklich entspannen.

¹ Für alle anderen Serviceroboter-Szenarien reicht selbst eine Reduzierung von 50% nicht aus.

BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVE

→ 2 ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG DER MARKTPOTENZIALANALYSE

Eine gute Wirtschaftlichkeit bedeutet nicht notwendigerweise eine hohe Ausnutzung der möglichen Marktpotenziale.

- Die durchgeführten Marktstrukturanalysen haben gezeigt, dass in vielen der Zielmärkte trotz positiver, einzelwirtschaftlicher Betrachtung die Finanzierungsmöglichkeit aus gesamtwirtschaftlicher Sicht einen Engpass, der einer raschen Marktdurchdringung der Serviceroboter-Lösung entgegensteht, darstellen könnten: Eine Serviceroboter-Investition ist in der Regel mit so hohen finanziellen Belastungen verbunden, dass eine Eigenfinanzierung der Investition nur für große Unternehmen in Frage kommt. Alle anderen müssen die Investition fremdfinanzieren. Die Realisierung einer geeigneten Fremdfinanzierung ist allerdings in den meisten Zielmärkten trotz der teilweise sehr positiven Wirtschaftlichkeitsrelation wenig wahrscheinlich. Ursächlich sind dafür aber weniger „zu lange“ Amortisationszeiträume – tatsächlich bewegen diese sich in den hier betrachteten, wirtschaftlichen Serviceroboter-Szenarien in einem durchweg akzeptablen Bereich – als vielmehr die Neuheit der zugrundeliegenden, technischen Konzepte („es liegen keine Erfahrungen vor“).
- Einige der Serviceroboter-Szenarien bedingen daher ggf. neue Geschäftsmodelle oder alternative Kunden-Hersteller Beziehungen, die möglicherweise zu Strukturbrüchen innerhalb eines Zielmarktes führen könnten (Beispiele sind hier die Szenarien „Kanalinspektion“ und „Fassadenreinigung“). Dies könnte bedeuten, dass einige Serviceroboter-Hersteller ihre tradierten Erlösmodelle, bei der in der Regel das Produkt bezahlt wird („pay for equipment“), durch neue Konzepte ersetzen, die die Leistung des Produktes in den Vordergrund stellen („pay per service“, „pay for availability“, „flat rate“). Dies könnte ggf. auch die angesprochenen Finanzierungsengpässe überwinden helfen und so die ausgewiesenen Marktpotenziale vergrößern. Dies gilt für alle hier betrachteten Serviceroboter-Szenarien.

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 1 SICHERHEIT

1 Sicherheit

Der folgende Abschnitt geht auf die Beurteilung der sicherheitstechnischen Machbarkeit der betrachteten Serviceroboter-Szenarien unter Maßgabe aktuell gültiger ISO-Normen sowie aktueller Normentwürfe ein. Eine Übersicht der in den Serviceroboter-Szenarien verwendeten Querschnittskomponenten mit TRL kleiner gleich 7 erfolgt in [Kapitel 4.2.2](#).

Bei der Entwicklung neuer Serviceroboter-Anwendungen muss stets auch die sichere Umsetzung der Anwendungen betrachtet werden. Insbesondere dann, wenn Roboter im direkten Umfeld von Menschen arbeiten und dabei einen hohen Automatisierungsgrad bzw. eine hohe Autonomie aufweisen, muss sichergestellt sein, dass sich aus der Interaktion mit dem Menschen keine Gefährdungen ergeben.

Grundlage für die sichere Gestaltung von Robotern ist unter anderem die Maschinenrichtlinie der Europäischen Union (2006 / 42 / EG), in der Basisanforderungen an die Sicherheit von Maschinen definiert werden. Innerhalb der Maschinenrichtlinie geben harmonisierte Normen konkretere Anweisungen, darunter zu allgemeinen Gestaltungsgrundsätzen bei der Konstruktion von Maschinen (ISO 12100-1/2), zur Durchführung von Risikoanalysen zur Bestimmung relevanter Gefährdungen (ISO 14121-1) und zur ausfallsicheren Gestaltung sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen (ISO 13849).

Auf diesen Grundnormen bauen Normen für einzelne Maschinentypen auf. So definiert die Norm ISO 10218 Sicherheitsanforderungen für die sichere Auslegung von Industrierobotern. Die derzeitige Fassung dieses Standards wurde im Jahr 2006 veröffentlicht. Eine aktualisierte Fassung wird voraussichtlich zusammen mit einem zweiten Teil im Jahr 2011 veröffentlicht. Da die ISO 10218 zum jetzigen Zeitpunkt als einzige Norm Sicherheitsanforderungen für die Manipulation mit Robotern definiert, stellt sie eine Referenz für Anwendungen außerhalb der Industrierobotik dar. Zur sicheren Mensch-Roboter-Kooperation bietet diese Norm drei verschiedene Ansätze:

- Handführen des Roboters mit einem Zustimmsschalter
- Sichere Positionsüberwachung in Kombination mit einer sicheren Geschwindigkeitsüberwachung
- Begrenzung der Antriebsleistungen

Im Bereich der Servicerobotik wird derzeit die Norm ISO 13482 zur Sicherheit von „Personal Care Robots“ entwickelt. Typische Anwendungsfelder sind hier mobile Assistenzroboter, Roboter zum Transport von Personen und Exoskelette. Der Anwendungsbereich der Norm umfasst aber auch andere Serviceroboter, deren Aufgaben eine direkte Unterstützung für den Menschen darstellen. Inhaltlich gehen die Anforderungen im Entwurf der Norm bislang nicht über die der ISO 10218 hinaus. Es ist allerdings davon auszugehen, dass bis zum Erscheinen der Norm im Jahr 2012 weitere, konkretere Anforderungen in Bezug auf das Erreichen bestimmter Sicherheitsniveaus festgelegt werden.

Im Bereich der mobilen Plattformen für Robotersysteme stellen die Normen zur sicheren Gestaltung von fahrerlosen Transportfahrzeugen eine Referenz dar. Die Sicherheitsanforderungen werden vor allem in der Norm DIN EN 1525 definiert. Die Norm wird allerdings gerade überarbeitet und wird in den nächsten Jahren unter dem Namen DIN EN ISO 3691-4 neu erscheinen. Die Norm sieht vor, die sichere Bewegung mobiler Plattformen vor allem durch Schaltleisten (bzw. „Bumper“) oder Laserscanner in einer Ebene ca. 20 cm über dem Boden zu gewährleisten.

Obwohl die Gefährdungsanalyse und die Risikominimierung immer für einen speziellen Anwendungsfall durchgeführt werden müssen, lassen sich in den genannten Normen einige generelle Sicherheitsanforderungen oder Regeln identifizieren, die sich in allgemeiner Form für nahezu alle in dieser Studie vorgestellten Serviceroboter-Szenarien anwenden lassen:



TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 1 SICHERHEIT

A. Räumliche Trennung von Mensch und Maschine. Durch den Einsatz von Schutzzäunen, Lichtschranken, Laserscannern oder ähnlichen Einrichtungen wird verhindert, dass ein Mensch die Gefahrenstelle erreichen kann. Diese Art der Absicherung bietet Schutz gegen viele unterschiedliche Gefährdungen, lässt sich aber in vielen Fällen, bei denen ein enger Kontakt zwischen Mensch und Maschine zur Ausführung der Aufgabe nötig ist, nicht anwenden.

B. Vermeidung von Quetsch- und Scherstellen. Bewegliche Teile, in die ein Mensch hineinlängen könnte, sind so zu gestalten, dass es möglichst wenige Stellen gibt, an denen Körperteile eingeklemmt oder anderweitig verletzt werden können. Maßnahmen können vom Abrunden scharfer Kanten bis zur Überwachung gefährlicher Stellen mit geeigneten Sensoren reichen.

C. Sichere Navigation. Ein autonom fahrendes Fahrzeug muss mit Sensoren ausgestattet sein, die eine Erkennung von Hindernissen auf dem Fahrweg erlauben. Mögliche Maßnahmen sind die Verwendung von Schaltflächen (Bumpen) und Laserscannern. Bei flachen Fahrzeugen genügt im Allgemeinen eine Absicherung in einer Ebene parallel zum Boden, während bei höheren Fahrzeugen unter Umständen eine dreidimensionale Absicherung benötigt wird.

D. Sichere Manipulation. Ein Manipulator muss über ausreichende Sensorik verfügen, um drohende Kollisionen rechtzeitig erkennen zu können, zum Beispiel eine taktile Schutzhülle. Durch Begrenzung der Leistungsdaten des Manipulators kann alternativ dafür gesorgt werden, dass im Falle einer Kollision kein Schaden entsteht. Dazu kommt beispielsweise eine nach Kategorie 3 (vereinfacht: beim Auftreten einzelner Fehler muss die Sicherheitsfunktion immer erhalten bleiben, z.B. durch konsequente zweikanalige Ausführung der Signalverarbeitung) sichere Reduzierung der Bewegungsgeschwindigkeit bzw. eine sichere Begrenzung der elektrischen Eingangsleistung in Frage.

E. Sichere Handhabung großer Gegenstände. Wenn Gegenstände transportiert oder bewegt werden, die so groß sind, dass sie die eventuell vorhandenen Sensoren des Roboters verdecken, muss sichergestellt sein, dass trotzdem keine

Person durch eine Kollision verletzt werden kann. Beim Öffnen von Türen muss beispielsweise überprüft werden, dass keine Person hinter der Tür eingeklemmt werden kann. Dies lässt sich zum Beispiel durch eine langsame Bewegung und die Überwachung der Kräfte beim Öffnen der Tür erreichen.

F. Schutz gegen Missbrauch. Insbesondere im öffentlichen Bereich muss davon ausgegangen werden, dass Robotersysteme unsachgemäß verwendet werden, zum Beispiel durch das unerlaubte Mitfahren auf mobilen Plattformen. Um dies zu verhindern, können zum Beispiel Kamerasysteme eingesetzt werden oder die Zuladung einer mobilen Plattform gemessen werden.

G. Gewährleistung der Stabilität. Fahrzeuge mit großen Auslegern müssen so gestaltet sein, dass der Schwerpunkt auch bei voll ausgestrecktem Ausleger nicht zu weit aus der Mitte des Fahrzeugs entfernt wird, so dass das Fahrzeug nicht umkippen kann.

In Tabelle 4-2.1 ist angegeben, auf welche der betrachteten Serviceroboter-Szenarien diese Sicherheitsanforderungen zutreffen. Zu jeder Gefährdung wird eine Einschätzung gegeben, wie hoch der Aufwand zur Absicherung nach heutigem Stand der Technik ist. Dazu werden die folgenden Kategorien definiert:

- **Leicht lösbar.** Entsprechende Sicherheitseinrichtungen sind Stand der Technik und können mit geringem Entwicklungsaufwand auf den neuen Anwendungsfall angepasst werden.
- **Lösbar.** Es existieren Sensorkonzepte für die Absicherung. Es sind jedoch Forschungs- und Entwicklungsaufwand nötig, um eine geeignete Sicherheitseinrichtung für den Anwendungsfall zu entwickeln.
- **Mit Einschränkungen lösbar.** Nach aktuellem Stand der Technik lässt sich der Anwendungsfall selbst unter erheblichem Forschungs- und Entwicklungsaufwand nur mit eingeschränkter Funktionalität absichern.



TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 1 SICHERHEIT

Serviceroboter-Szenario	Gefährdung	Regel	Realisierbarkeit
Außenanlagen-wartung	Betreten des Arbeitsbereichs des Roboters	A	Leicht lösbar – Absperrung des zu bearbeitenden Bereichs und gegebenenfalls zusätzliche Sensorik am Fahrzeug (siehe ISO 14120)
Bereitstellen von Pflegeutensilien	Kollision der Plattform mit der Umgebung	C	Leicht lösbar – Absicherung in der Ebene ist Standard bei fahrerlosen Transportsystemen (siehe DIN EN 1525)
	Einklemmen am Manipulator oder an den Schubladen	B	Lösbar – durch Vermeidung scharfer Kanten und der Überwachung der zum Bewegen nötigen Kräfte (siehe ISO 13854)
	Kollision zwischen Manipulator und Umgebung	D	Lösbar – Ansätze mit einer Kombination aus Sensorhaut und Überwachung der Geschwindigkeit existieren (siehe ISO 10218)
	Greifen schwerer Gegenstände mit ausgestrecktem Arm	G	Lösbar – Konstruktive Optimierung der Massenverteilung und Beschränkung der Zuladung für den Manipulator (siehe ISO / DIN 13482)
Bewegen von Personen in der Pflege	Kollision der Plattform oder des Aufbaus mit der Umgebung	C	Lösbar – Nutzung zusätzlicher 3-D-Sensorik zur Hindernisdetektion auf dem Fahrweg
	Einklemmen an bewegten Teilen und insbesondere beim Aufhebevorgang	B	Lösbar – durch Vermeidung scharfer Kanten und der Überwachung der zum Bewegen nötigen Kräfte
Bodenfrüchte-ernte	Hineingreifen in bewegte Roboterarme	A	Leicht lösbar – Vollständige Trennung von Mensch und Roboter durch Lichtvorhänge oder Laserscanner (siehe ISO 14120)
Bodenreinigung	Kollision der Plattform mit der Umgebung	C	Leicht lösbar – Absicherung in der Ebene ist Standard bei fahrerlosen Transportsystemen (siehe DIN EN 1525)
	Kontakt zwischen Mensch und Manipulator	B, D	Lösbar – Ansätze mit einer Kombination aus Sensorhaut und Überwachung der Geschwindigkeit existieren (siehe ISO 10218)
	Kollision zwischen Mensch und bewegten Möbeln	E	Mit Einschränkungen lösbar – z.B. Roboter arbeitet nur, wenn Mensch einen ausreichenden Sicherheitsabstand hält
Container-transport im Krankenhaus	Kollision der Plattform oder des Aufbaus mit der Umgebung	C	Lösbar – Nutzung zusätzlicher 3-D-Sensorik zur Hindernisdetektion auf dem Fahrweg
	Einklemmen an bewegten Teilen und insbesondere beim Anhebevorgang	B	Lösbar – durch Vermeidung scharfer Kanten und der Überwachung der zum Bewegen nötigen Kräfte
	Schutz gegen unerlaubtes Mitfahren und anderen unsachgemäßen Gebrauch	F	Mit Einschränkungen lösbar – Durch Messung des Gewichts der Zuladung teilweise lösbar.
Fassadenreini-gung	Hineingreifen in den Arbeitsbereich des Roboters	A	Leicht lösbar – Absperrung des Bereichs direkt unter der Fassade (siehe ISO 14120)
Innenausbau-assistenz	Kollision der Plattform oder des Aufbaus mit der Umgebung	C	Lösbar – Nutzung zusätzlicher 3-D-Sensorik zur Hindernisdetektion auf dem Fahrweg
	Kontakt zwischen Mensch und Manipulator	B, D	Lösbar – Ansätze mit einer Kombination aus Sensorhaut und Überwachung der Geschwindigkeit existieren (siehe ISO 10218)
	Kontakt zwischen Mensch und den Werkzeugen am Manipulator	D	Lösbar – Ansätze zur Ausstattung von Werkzeugen mit Schutzhüllen in Kombination mit einer Überwachung der Betätigungskraft existieren
	Kollision zwischen Mensch und bewegten Baumaterialien	E	Mit Einschränkungen lösbar – z.B. Roboter arbeitet nur, wenn Mensch ausreichenden Sicherheitsabstand hält
	Greifen schwerer Gegenstände mit ausgestrecktem Arm	G	Lösbar – Konstruktive Optimierung der Massenverteilung und Beschränkung der Zuladung für den Manipulator (siehe ISO 13482)

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 1 SICHERHEIT

Serviceroboter-Szenario	Gefährdung	Regel	Realisierbarkeit
Kanalinspektion	Kontakt zwischen Menschen und dem Roboter	A	Leicht lösbar – Kanal schützt den Roboter hinreichend vor Kontakt
Milchviehwirtschaft	Mensch greift in den Arbeitsbereich des Roboters	A	Leicht lösbar – Einzäunung des Roboters von drei Seiten (siehe ISO 14120)
	Kollision des Manipulators mit der Kuh	D	Lösbar – Nutzung von 3-D-Sensoren zur Arbeitsraumüberwachung, ggf. in Kombination mit Bumpers
Produktionsassistenz	Kollision der Plattform mit der Umgebung	C	Leicht lösbar – Absicherung in der Ebene ist Standard bei fahrerlosen Transportsystemen (siehe DIN EN 1525)
	Kontakt zwischen Mensch und Manipulator und Einklemmen in der Karosserie	B, D	Lösbar – Ansätze mit einer Kombination aus Sensorhaut und Überwachung der Geschwindigkeit existieren (siehe ISO 10218)

Tab. 4-2.1 Gefährdungen und mögliche Sicherheitsmaßnahmen für die betrachteten Serviceroboter-Szenarien

Für alle ergriffenen Maßnahmen zur Absicherung der Serviceroboter-Anwendungen müssen jeweils gemäß ISO 14121-1 in einer Risikoanalyse evaluiert werden, inwieweit sie das vorhandene Risiko tatsächlich senken und ob das verbleibende Restrisiko für die Anwendung akzeptabel ist. Gegebenenfalls müssen dann weitere Sicherheitseinrichtungen oder eine Kombination aus mehreren Maßnahmen eingesetzt werden, um das Risiko weiter zu reduzieren.

Werden Sicherheitsfunktionen über die Steuerung der Maschine realisiert, zum Beispiel wenn die Einhaltung einer sicheren Geschwindigkeit per Software überwacht wird, muss auch immer die Ausfallwahrscheinlichkeit der sicherheitsrelevanten Teile der Steuerung überprüft werden. Gegebenenfalls müssen Systeme dann zweikanalig ausgelegt oder mit einer zusätzlichen Testeinrichtung in regelmäßigen Abständen überprüft

werden. Solange keine Normen existieren, die die benötigte Ausfallsicherheit spezifizieren, kann der Roboterhersteller frei entscheiden, welche Zuverlässigkeitsanforderungen er für angemessen hält. Nach dem Erscheinen der Norm ISO 13482 für „Personal Care Robots“ (voraussichtlich 2012 bis 2013) werden in einigen Bereichen Zuverlässigkeitsanforderungen in Form von Performance Levels (PL) oder Safety Integrity Levels (SIL) vorgegeben sein.

Generell ist davon auszugehen, dass für die überwiegende Mehrheit der in dieser Studie ausgearbeiteten Serviceroboter-Szenarien ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann. Allerdings ist dazu oftmals noch auf den konkreten Anwendungsfall bezogener Forschungs- und Entwicklungsaufwand nötig.

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 2 MECHATRONISCHE SCHLÜSSELKOMPONENTEN

2 Mechatronische Schlüsselkomponenten

Mechatronische Schlüsselkomponenten, die in den Serviceroboter-Szenarien in der technischen Bewertung mit TRL kleiner gleich 7 identifiziert wurden, sind in Tabelle 4-2.2

dargestellt. Hierbei erfolgt die Bewertung der Komponente anhand eines TRL-Euro-Diagramms in Bezug auf kritisches Anforderungskriterium, TRL und angenommene Stückkosten.

Komponenten-Bezeichnung	TRL / € / FR-Diagramm	Bewertung
<p>Szenario Fassadenreinigung</p> <p>Seilkinematik zum Bewegen des Reinigungsmoduls.</p>		<p>Die im Szenario verwendeten Seilkinematiken existieren als Demonstrator. Die Ausprägung der Seilkinematik mit der geforderten Lastkapazität von 50 kg als modulares, rasch konfigurierbares System innerhalb der geplanten Arbeitsräume (aktuell TRL 5) wird als prinzipiell machbar angesehen.</p>
<p>Szenario Produktionsassistenz</p> <p>Armkinematik (6 DOF, 25 kg Nutzlast) mit Eigengewicht-zu-Nutzlast-Verhältnis von besser als 1:1</p>		<p>Produktionsaufgaben erfordern teilweise Handhabungskapazitäten von Leichtbau-Roboterarmen über den aktuell gängigen bzw. angekündigten 7 bzw. 14 kg. Handhabungslasten deutlich über den manuell zumutbaren 15 kg sind für den Robotereinsatz interessant bei einem Roboterarmgewicht von 25 kg.</p>
<p>Szenario Bewegen von Personen, Innenausbauassistenz</p> <p>Armmodule für hohe Traglasten bzw. Momente, Handhabungsgewichte über 50 kg (beim Bewegen von Personen verteilt sich die Maximallast auf 3 Armmodule) in dem dargestellten Szenario.</p>		<p>Armmodule zur aufgabenorientierten Bildung kinematischer Ketten für kleinere Lasten (max. 250 Nm bewältigbares Drehmoment in den Gelenken) sind marktgängig. Kompakte, leichte Module mit Momentenkapazitäten von 0,5-1 kNm könnten für gewerbliche Applikationen interessant sein. Sie sind zwar noch nicht in dieser Lastklasse verfügbar, aber deren Realisierung wird als machbar angesehen.</p>

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 2 MECHATRONISCHE SCHLÜSSELKOMPONENTEN

Komponenten-Bezeichnung	TRL/€/FR-Diagramm	Bewertung
Szenarien Innenausbauassistent, Milchviehwirtschaft, Bereitstellen von Pflegeutensilien, Produktionsassistent Armkinematik verkleidet mit berührungslos auslösendem Einklemmschutz (mindestens 10 cm Auslöseabstand)		Berührende Schutzverkleidungen für Roboterarme sind seit einiger Zeit vorhanden (Bumper); berührungslose Roboterhäute für Gelenk-Kinematiken werden erprobt/erforscht (z.B. als Bumper mit kapazitiven Schaltflächen). Gefordert wird ein berührungsloser Schaltabstand von mindestens 10 cm unter Maßgabe einer sicherheitstechnischen Eignung.
Szenario Containertransport, Bereitstellen von Pflegeutensilien, Produktionsassistent Kollisionsschutz mittels 3-D arbeitsraumüberwachender Kamera.		Annähernde Bewegungen von ca. 4 m/s Geschwindigkeit (z.B. Armbewegungen, rasch laufende Personen) sollen im Sinne der Norm sicher detektiert werden. Was marktgängige 3-D-Kameras bereits erreichen, ist noch nicht mit SIL 3 Zertifizierung (sichere, zwei kanalige Ausführung) möglich.
Szenario Bodenfrüchteernte, Produktionsassistent 3-Fingergreifer mit Kraftsensorik (formschlüssiger Griff)		Das Greifen von Alltagsobjekten erfordert flexible Greifwerkzeuge mit taktile Sensorik und großen Greifweiten (s.u.). Erste Hände für FuE und ausgewählte Anwendungen sind marktgängig (TRL 6, Prototypen); Robustheit unter Alltagsbedingungen (mechanisch gegen Überlastung, Kollision, feuchtigkeits- und staubdicht, einfach reinigbar etc.) und outdoor-Fähigkeit (Wind, Wetter, Temperatur, Schmutz, chemische Beständigkeit) sind interessant.



TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 2 MECHATRONISCHE SCHLÜSSELKOMPONENTEN

Komponenten-Bezeichnung	TRL/€/FR-Diagramm	Bewertung
<p>Szenario Bereitstellen von Pflegeutensilien, Produktionsassistentz</p> <p>Kopplung von 3-D-Sensorik und Farb-Kamera-System: mit min VGA-Auflösung (>300 kpx)</p>	<p>TRL ↓ VGA (300 kpx) 1 mpx</p>	<p>Kombination von 3-D-CCD-Kameras und Farbkameras mit Auflösung von mindestens 300 kpx wurden mehrfach in FuE-Projekten für Demonstratoren konfiguriert und aufeinander kalibriert, bislang jedoch kein marktgängiges Produkt vorhanden.</p>
<p>Szenario Bereitstellen von Pflegeutensilien</p> <p>Weitgreifende, kompakte 2-Finger-Greifer (10-50 cm)</p>	<p>TRL ↓ 10 cm 50 cm</p>	<p>Vielfältige Greiferprinzipien existieren als Funktionsmuster, Prototypen und Produkte. Für das Spektrum an Alltagsgegenständen sind variable Griffweiten ohne aufwändigen Greiferwechsel interessant. Entsprechende kompakte, für die angegebene Greifspanne geeignete Konstruktionen existieren noch nicht.</p>
<p>Szenario Bodenreinigung</p> <p>Absolute Indoor-Groblokalisierung (indoor-GPS)</p>	<p>TRL ↓ -50 cm Position +50 cm</p>	<p>Vereinzelte Verfahren zum indoor-GPS wurden als Demonstratoren bereits vorgestellt. Großflächige indoor-Lokalisierungen im Genauigkeitsbereich besser 50 cm wären für indoor-Serviceroboter-Anwendungen interessant: entweder als redundantes System herkömmlicher Navigation über Laserscanner oder als low-cost Variante für die verlässliche lokale und globale Ortung in Gebäuden.</p>



01

02

03

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 2 MECHATRONISCHE SCHLÜSSELKOMPONENTEN

Komponenten-Bezeichnung	TRL/€/FR-Diagramm	Bewertung
Szenario Bodenreinigung, Containertransport Positionsbestimmung auf der Basis natürlicher Landmarken	<p>The diagram is a coordinate system with a vertical axis labeled '€' and a horizontal axis labeled 'TRL'. The vertical axis has tick marks at 1, 3, 5, 7, and 9. The horizontal axis has tick marks at -5 cm and +5 cm. A grey rectangular box is centered at TRL 0 and extends from approximately 3 to 5 on the vertical axis. A horizontal line is drawn at the level of 3 on the vertical axis, labeled 'FR4,1' and '3'. Two vertical red bars are positioned at -5 cm and +5 cm on the horizontal axis, extending from the bottom to the level of 3 on the vertical axis. The number '500 €' is written to the right of the box.</p>	<p>Kamerabasierte Positionsbestimmung von mobilen Plattformen ist FuE-Thema und wurde für Haushaltsanwendungen (Robosauger) erstmals angekündigt. Für die verlässliche Navigation in Alltagsumgebungen mit Kameras besteht insbesondere unter dem Aspekt der Flexibilität (rasches Einrichten) und auch unter Kostenaspekten (siehe Bodenreinigung) Bedarf, der ggf. durch Technologien aus dem Consumer-Bereich befriedigt wird.</p>

Tab. 4-2.2 In den Serviceroboter-Szenarien außerhalb der Katalogauswahl verbaute mechatronische Komponenten mit $TRL \leq 7$

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Mechatronische Komponenten für Serviceroboter-Anwendungen sind aktuell in zufriedenstellender Vollständigkeit, wenn auch, aufgrund der eingeschränkten Stückzahlen, zu hohen Preisen oder erst als Prototypen verfügbar. Diese Aussage gilt für die Serviceroboter in gewerblichen (bzw. industriellen) Anwendungen und ist nur eingeschränkt auf die domestische / private Robotik übertragbar. Wesentlicher Bedarf besteht in der Verfügbarkeit von Kinematiken mit hohem Nutzlast-Eigengewicht-Verhältnis für handwerkertypische Kräfte (Handhaben von Objekten von 50 kg) mit entsprechenden Reichweiten sowie für die Kollisions- und Arbeitsraumabsicherung durch 3-D-Sensoren oder berührungslose Bumper.

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 3 SOFTWARE-KOSTEN

3 Software-Kosten

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde versucht, die Kosten für die Entwicklung von Software für Serviceroboter gemäß der in [Kapitel 2.3.1.2](#) vorgestellten Methode abzuschätzen, wobei lediglich Informationen über gewünschte grundlegende Funktionalitäten bekannt waren. Zentrales Problem derartiger Schätzungen ist die hohe Ungenauigkeit, die aus der unsicheren Datenlage über die zu erstellende Software resultiert.

In etablierten Bereichen der Software-Branche, z.B. Betriebssystementwicklung, mildert man diesen Umstand ab, indem man entweder auf Datenbanken mit umfangreichen Informationen über Tausende von abgeschlossenen Software-Projekten oder auf Expertenwissen zurückgreift. Diese Möglichkeit ist aber nur in beschränktem Umfang für die Servicerobotik nutzbar, da derartige Datenbanken speziell für Robotik-Software-Projekte nicht existieren.

Auch wenn die Schätzungen, die in dieser Studie vorgenommen wurden (Tab. 4-2.3), mit hoher Unsicherheit behaftet sind, ist der Anteil der Software-Entwicklung an den Gesamtkosten für den Aufbau eines Serviceroboters, insbesondere unter Berücksichtigung der abgeschätzten Stückzahlen keinesfalls zu vernachlässigen.

Szenario	Marktpotenzialabschätzung in SR pro Jahr (Stück)	Geschätzte Gesamtkosten in Mio Euro der verwendeten SW (siehe Steckbriefe)
Außenanlagenwartung	391	1,5
Bereitstellen von Pflegeutensilien	5 – 10	6,8
Bewegen von Personen	6	5,0
Bodenfrüchteernte	36	0,9
Bodenreinigung	27 – 49	14,0
Containertransport	40 – 60	3,3
Fassadenreinigung	3	4,2
Innenausbauassistenz	6	4,3
Kanalinspektion	30 – 60	0,3
Milchviehhaltung	62	4,4
Produktionsassistenz	903 – 1 374	4,4

Tab. 4-2.3 Zusammenfassung der Software-Kosten der betrachteten Serviceroboter-Szenarien

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 4 ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG DER VERWENDETEN KOMPONENTEN UND TECHNOLOGIEN

4 Zusammenfassende Beurteilung der verwendeten Komponenten und Technologien

Die ermittelten Technologiebedarfe der Szenarien und die Analyse anwendungsübergreifend eingesetzter Verfahren und Methoden zur Entwicklung von Serviceroboter-Systemen führen auf folgende Kernbotschaften:

Die sicherheitstechnische Auslegung von Servicerobotern ist auf der Basis bestehender Normen komplex, aber machbar.

Die Sicherheit von Servicerobotern ist elementare Voraussetzung für deren Markteinführung. In *Kapitel 4.2.1* erfolgt die Darstellung möglicher Gefährdungen durch die betrachteten Serviceroboter und die Auflistung möglicher Sicherheitsmaßnahmen. Gefährdungen lassen sich auf der Basis heute verfügbarer Methoden ermitteln und mit gängigen Maßnahmen begegnen:

- Bestehende ISO-Normenwerke bilden in fast allen betrachteten Fällen eine ausreichende Grundlage zur Risikobewertung und sicherheitstechnischen Auslegung von Serviceroboter-Systemen. Diese Normen entstammen aus dem Umfeld der industriellen Automatisierungstechnik. Weitere Normen insbesondere mit spezifischem Fokus auf der Sicherheit von Serviceroboter-Systemen sind aktuell in Vorbereitung².
- Die Risikobewertung und die sicherheitstechnische Auslegung von Serviceroboter-Systemen erfordert umfangreiche Kenntnis komplexer Normenwerke sowie Erfahrung in der Realisierung und Zertifizierung von Serviceroboter-Systemen. Für Entwickler stellt dies aktuell einen erheblichen Einarbeitungsaufwand dar. Standard-Vorgehensweisen und Best-Practice-Beispiele fehlen derzeit weitgehend, wären aber im Sinne einer Effizienz und Risikominimierung künftiger Serviceroboter-Entwicklungen hilfreich.

Ein weites Spektrum an mechatronischen Schlüsselkomponenten ist für die Servicerobotik bereits verfügbar.

Die vorgestellten Serviceroboter-Anwendungen wurden bereits auf der Basis eines Katalogs mechatronischer Komponenten aufgebaut. Hieraus ergab sich – praktisch automatisch – eine sich über die Anwendungen erstreckende Gleichteilestrategie:

- Es zeigt sich ein vergleichsweise geringer Bedarf an grundsätzlich neuen, noch nicht verfügbaren mechatronischen Komponenten für die betrachteten Anwendungen. Die Ergebnisse früherer Forschungsinitiativen zur Schaffung von (Service-)Roboterkomponenten stehen inzwischen als Prototypen oder Kleinserienprodukte zur Verfügung wie z.B. mobile Plattformen, Leichtbauarme, mehrfingrige Hände, 3-D-Kameras und Navigationssensoren (mit TRL 6-7).³
- Der Komponenten-Katalog, obwohl unvollständig, erwies sich als hilfreich und in den meisten Fällen in Bezug auf kritische mechatronische Schlüsselkomponenten ausreichend. Die zum Teil sehr hohen Komponentenpreise verweisen auf die derzeit geringen Absatzstückzahlen. Auf die vergleichsweise geringen Auswirkungen von Economies of Scale-Effekten (siehe *Kapitel 4.1.2*) sei nochmals hingewiesen.
- Im Bereich von Sicherheitskomponenten fehlen noch Komponenten, die die physische Interaktion zwischen Mensch und Roboter unter Maßgabe aktueller und angekündigter Sicherheitsnormen ermöglichen.

² ISO TC 184/SC2 Robots and robotic devices; http://www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/other_bodies/iso_technical_committee.htm?commid=54138

³ Projekt DESIRE (Deutsche Servicerobotik Initiative); <http://www.servicerobotik-initiative.de/multimedia/bilder>

TECHNISCHE PERSPEKTIVE

→ 4 ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG DER VERWENDETEN KOMponentEN UND TECHNOLOGIEN

Die erheblichen Software-Entwicklungskosten verlangen nach anwendungsübergreifender Wiederverwendung von Software-Komponenten.

Die Entwicklung von Software verursacht signifikante Kosten bei den Herstellern und Integratoren von Servicerobotern bei vergleichsweise geringen Produkt-Stückzahlen in Bezug auf ein spezifisches Produkt:

- Anwendungsübergreifende, effizient wiederverwendbare Komponenten innerhalb standardisierter System-Architekturen sind gerade im vorliegenden Fall kleiner bis mittlerer Stückzahlen unabdingbar, um die Software-Entwicklungskosten einzudämmen. Diese Herausforderung war und ist Gegenstand von Forschungsprojekten wie DESIRE oder BRICS.^{3,4} Eine effiziente Nutzung von serviceroboter-typischen Software-Komponenten durch potenziellen Hersteller/Ausrüster ist noch nicht zufriedenstellend gelöst, aber angesichts der damit verbundenen Entwicklungsrisiken und -Kosten von entscheidender Bedeutung.
- Um Herstellern und Systemintegratoren für Servicerobotik mehr Planungssicherheit zu vermitteln und somit auch den Markteintritt zu erleichtern, erscheint es daher ratsam, die öffentliche Bereitstellung von Erfahrungswissen über Software-Entwicklung in der Servicerobotik zu fördern, siehe auch Kapitel 4.3.4 zu konkreten Maßnahmen.
- Bei der Abschätzung von Software-Entwicklungskosten für Serviceroboter-Systeme besteht bei Ausrüsterindustrien wenig Erfahrung und wird eher zu optimistisch angesetzt. Hier besteht Bedarf nach Hilfsmitteln eines Software-Engineerings, das Ressourcen-Einsatz planen und kontrollieren hilft.

4 BRICS – Best Practice in Robotics; EU-FP7 Integrated Project, <http://www.best-of-robotics.org>

FORSCHUNGSBEDARFE

Inhalt dieses Kapitels ist es, mögliche grundlegende Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in Bezug auf applikationsübergreifende Schlüsseltechnologien und Methoden aus den ausgeführten Serviceroboter-Szenarien herzuleiten. Bedarfe mit großer Hebelwirkung für die Erschließung des Zukunftsmarktes gewerblicher Serviceroboter-Anwendungen werden als Handlungsempfehlungen für das BMBF formuliert.

Zunächst erfolgt die Diskussion der in den Serviceroboter-Szenarien verwendeten, für die Servicerobotik charakteristischen Schlüsseltechnologien mit vorrangigem Software-Bezug (*Kapitel 5.3*). Methoden und Werkzeuge einer effizienten Serviceroboter-Entwicklung, insbesondere aus Ausrüstersicht mit dem Schwerpunkt auf Software-Engineering werden in *Kapitel 5.4* vorgestellt.

Verteilung Software-Komponenten

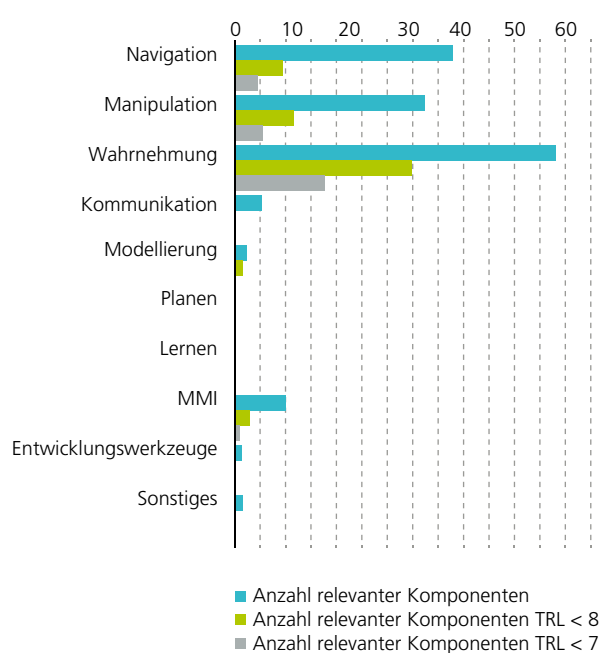


Abb. 4-3.1 Verteilung der relevanten Software-Komponenten in den betrachteten Serviceroboter-Szenarien

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 1 VORRANGIGE SCHLÜSSELFUNKTIONEN DER BETRACHTETEN SERVICEROBOTER-ANWENDUNGEN

1 Vorrangige Schlüsselfunktionen der betrachteten Serviceroboter-Anwendungen

Beim Entwurf der Roboterlösungen für die dargestellten Serviceroboter-Szenarien wurden Schlüsselkomponenten aus verschiedenen Technologiebereichen verwendet. Um Forschungsempfehlungen abzuleiten, wurde nach Häufungen von Technologien gesucht, die noch nicht Serienreife erreicht haben (TRL ≤ 7). Abb. 4-3.1 veranschaulicht die Häufungen über alle Serviceroboter-Szenarien aufgeteilt nach der in EFFIROB verwendeten Taxonomie graphisch.⁵

Komponenten mit technologischen Reifegraden unter 8 werden als noch nicht ausgereift bewertet und bieten somit das größte Verbesserungspotenzial. Exemplarisch dargestellt sind die Häufungen insgesamt sowie Häufungen für Komponenten mit TRL kleiner 8 und TRL kleiner 7; die Verteilungen scheinen proportional zueinander zu sein.

In der nachfolgenden Diskussion sollen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in den vier wesentlichen Basis-Funktionen weiter diskutiert werden: Wahrnehmung, Navigation, Manipulation und Mensch-Maschine-Interaktion (MMI).

In den Serviceroboter-Szenarien wurden typische Funktionen der kognitiven Robotik (z.B. Planen und maschinelles Lernen), nicht verwendet (wie in [Kapitel 2.2.2](#) begründet) und werden demnach nicht weiter in Bezug auf Forschungsbedarfe untersucht. Für die Szenarienbearbeitung wurde die in Tabelle 4-3.1 dargestellte Kategorisierung der Basisfunktionen verwendet, zu Vergleichszwecken der EUROP-Taxonomie gegenübergestellt.⁶

Taxonomie in dieser Studie	Taxonomie in EUROP (Englisch)
Navigation	Locomotion, Navigation
Manipulation	Actuation, End Effectors, Control
Wahrnehmung	Sensors, Sensing & Perception
Kommunikation	(Real-time) Communication
Modellierung	Modelling
Planen	Planning
(Maschinelles) Lernen	Learning
Mensch-Maschine-Interaktion	Human Machine Interface
Entwicklungswerkzeuge	Systems Engineering Tools, System Architecture
Sonstiges	Cooperating Robots & Ambient Intelligence, Power Management, Materials

Tab. 4-3.1 Funktionentaxonomie in EFFIROB im Vergleich zu EUROP⁵

⁵ Den Kategorien Navigation und Manipulation wurden auch Algorithmen zugeordnet, die primär dem Zwecke dieser Funktionskategorie dienen, aber auch in andere Kategorien passen würden (z.B. Bahnplanung). Dies soll Doppelnennungen in verschiedenen Kategorien vermeiden, d.h. jede Komponente wurde genau einer Kategorie zugeordnet.

⁶ <http://www.robotics-platform.eu/sra>

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 2 ABHÄNGIGKEITEN INNERHALB DER SERVICEROBOTIK-SCHLÜSSELKOMPONENTEN

2 Abhängigkeiten innerhalb der Servicerobotik-Schlüsselkomponenten

Ausgehend von der Definition der Basisfunktion „Wahrnehmung“ (siehe [Kapitel 2.2.2](#)) gliedern sich die einzelnen Schlüsselfunktionen nach der in Abb. 4-3.2 dargestellten Taxonomie. Es wird betont, dass diese Taxonomie nicht vollständig ist, da sie sich nur auf die in den untersuchten Serviceroboter-Szenarien verwendeten Schlüsselfunktionen bezieht.

Hierbei ist die Wahrnehmung unterteilt nach indoor- und outdoor-Einsatzumgebungen. Der Grund hierfür sind für die jeweiligen Umgebungen typische unterschiedliche Objekte und damit verbundene typische Anforderungen. Indoor-Umgebungen bezeichnen hierbei geschlossene und (teil)strukturierte, durch künstliches oder natürliches Licht durchflutete Räume wie z.B. Produktionshallen, Krankenhäuser, Büroumgebungen, etc. Outdoor-Umgebungen stehen für meist unstrukturierte Freilandumgebungen mit natürlicher Vegetation, typischen Witterungseinflüssen und wechselnden Tageslichtverhältnissen.

Wahrnehmungsaufgaben für indoor-Anwendungen in der Servicerobotik umfassen Objektidentifikation, Szenenanalyse und Personenerkennung. Alltagsobjekte bezeichnen hierbei Artefakte, die durch Personal in den jeweiligen betrachteten Serviceroboter-Szenarien gehandhabt, bedient und benutzt werden.

Die Wahrnehmung durch Sensoren ist stochastischen, ggf. gleichzeitig wirkenden Störgrößen ausgesetzt. Beispielsweise

sind dies Verdeckungen von Objekten (d.h. Objekte, Personen oder Körperteile sind nur teilweise sichtbar), variierende äußere Lichteinflüsse (sich ändernde Lichtquellen, Lichtstärken, Abschattungen) oder variierende Objekt-Eigenschaften, die Auswirkungen (durch Lage- und Geometrieabweichungen, variierende Oberflächenfarben, -reflexionen etc.) auf empfangende Sensorsignale haben. Dementsprechend werden an die Schlüsselfunktionen neben den zu erzielenden Leistungsdaten zur Identifikation, Genauigkeiten der Objektlokalisierungen etc. Robustheitsanforderungen gegen wirkende Störgrößen gestellt.

Die Aufgaben der planenden Navigation nach Abb. 4-3.3 sind:

- die Ermittlung der Position des Roboters (Ortung) sowie die Planung einer optimierten Bahn zum gewünschten Zielpunkt,
- die Berechnung von Ausweichmanövern und
- gegebenenfalls die Planung eines Ersatzweges zum Ziel, wenn Hindernisse den Weg verstellen.

Alle diese Verfahrensschritte erfolgen auf der Basis einer sensorischen Wahrnehmung von Objekten, Personen und Umgebungen. Die Kompensation wirkender Störgrößen wie die Lagestützung bei Odometriefehlern, Abgleich und Aktualisierung ungenauer bzw. unvollständiger Karten sowie die laufende Erfassung von Hindernissen nutzt typische Schlüsselfunktionen der Wahrnehmung, welche wiederum den beschriebenen Störgrößen bei der Objektidentifikation, Szenenanalyse und Personenerkennung ausgesetzt sind.

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 2 ABHÄNGIGKEITEN INNERHALB DER SERVICEROBOTIK-SCHLÜSSELKOMPONENTEN

Obwohl die Ortung in outdoor-Umgebungen durch GPS-basierte Systeme relativ genau erfolgen kann (ca. $\pm 0,1$ m durch Differential-GPS), erfolgen die Erstellung bzw. das Update von Karten, die Umgebungs- und Hinderniserkennung sowie die Erkennung von natürlichen und künstlichen Landmarken oder Baken zur Lagestützung unter den typischen outdoor-Bedingungen und Störgrößen. Demnach wird im Weiteren zwischen indoor- und outdoor-Navigation unterschieden. Die Manipulation bei Robotern umfasst das Greifen, Sichern und räumliche Führen von Objekten oder Werkzeugen.

Dabei bestehen die in den Szenarien vorgesehenen Manipulatoren oder Kinematiken aus einer Folge von 4 bis 7 Gelenken (siehe [Kapitel 2.2.3](#)). Die automatisierte Führung des Endeffektors in teil- oder unstrukturierten Umgebungen erfordern die enge Koordination von Wahrnehmung und Armbewegung. Praktisch alle diskutierten Serviceroboter-Anwendungen beruhen, zumindest für einen Teil der Tätigkeitsausführung, auf sensorgestützter Bahnplanung, -führung und Grifffindung; wie in Abb. 4-3.4 durch die roten Schnittpunkte markiert wird.

Taxonomie Wahrnehmung

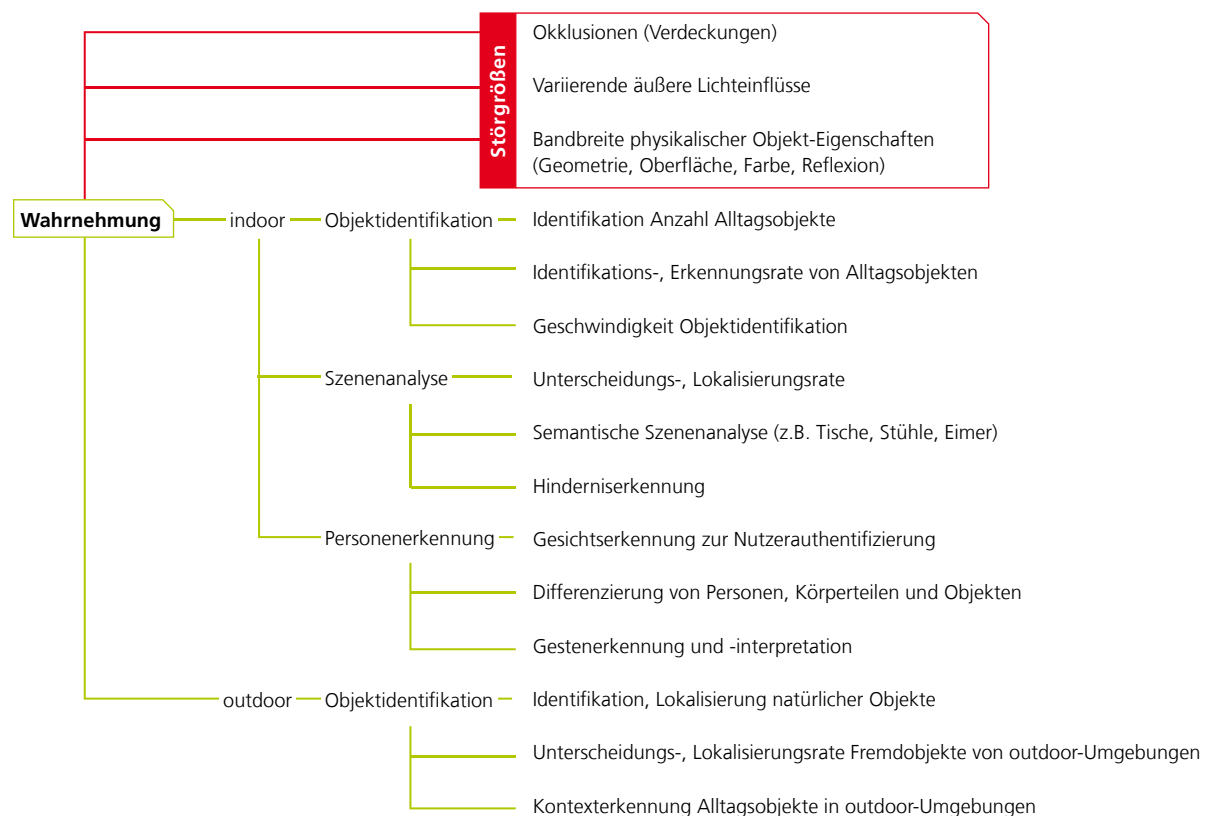


Abb. 4-3.2 Taxonomie der Wahrnehmungs-Schlüsselfunktionen in Serviceroboter-Anwendungen mit typischen Störgrößen



FORSCHUNGSBEDARFE

→ 2 ABHÄNGIGKEITEN INNERHALB DER SERVICEROBOTIK-SCHLÜSSELKOMPONENTEN

Taxonomie Navigation

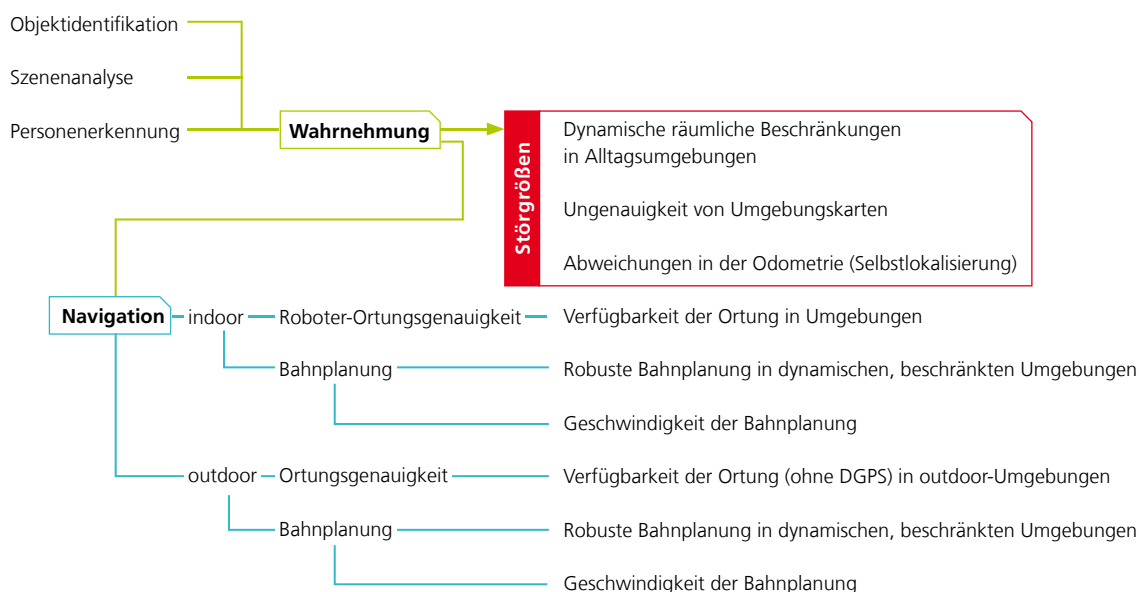


Abb. 4-3.3 Taxonomie der Navigations-Schlüsselfunktionen in Serviceroboter-Anwendungen mit typischen Störgrößen

Taxonomie Manipulation

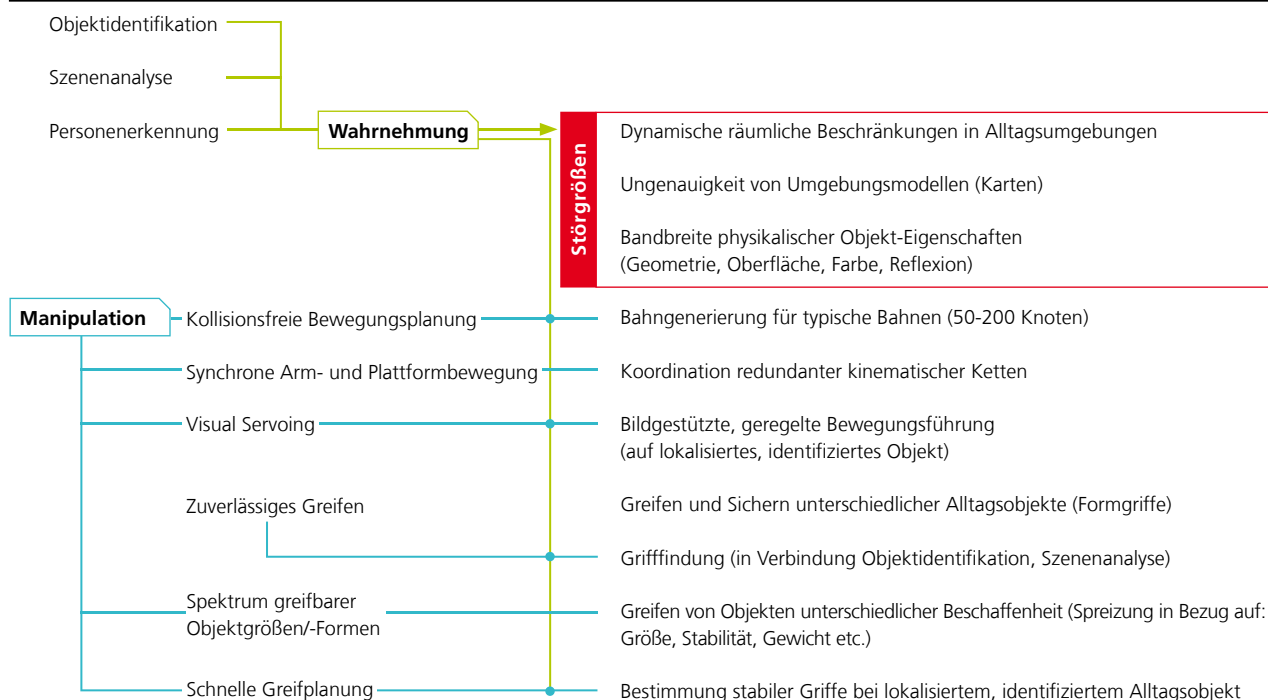


Abb. 4-3.4 Taxonomie der Manipulations-Schlüsselfunktionen in Serviceroboter-Anwendungen

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 2 ABHÄNGIGKEITEN INNERHALB DER SERVICEROBOTIK-SCHLÜSSELKOMPONENTEN

Die Abhängigkeiten der Mensch-Maschine-Interaktion von Wahrnehmungsfunktionen (unter Störgrößen) ist in Abb. 4-3.5 dargestellt. Die Mensch-Maschine-Interaktion im Fall von Serviceroboter-Anwendungen umfasst die Belehrung von Robotern (Objekte, Handlungen, Orte) durch den Bediener, die arbeitsteilige Aufgabenausführung mit dem Werker oder die Teleoperation. Hier umfassen Wahrnehmungsfunktionen die Erkennung bzw. Ortung des Menschen zur sicheren Erkennung von Sprachbefehlen sowie das Einlernen von Objekten, Umgebungen oder Bewegungen bzw. von Bewegungsfolgen (insbesondere durch Gestik).

Die Teleoperation von Servicerobotern kann beispielweise durch die Verwendung von Augmented Reality-Technologien intuitiv und verlässlich erfolgen. Sie umfasst die meist synchrone visuelle Überlagerung von virtueller Information mit Realbildern. Herausforderung ist die Erzielung einer genauen und robusten Kalibrierung zur Überlagerung generierter Bilddaten mit realen Ansichten. Hierzu sind Umgebungs- bzw. Objektmerkmale, möglicherweise auch Personen kontinuierlich zu erkennen und ggf. zu tracken.

Taxonomie Mensch-Maschine-Interaktion

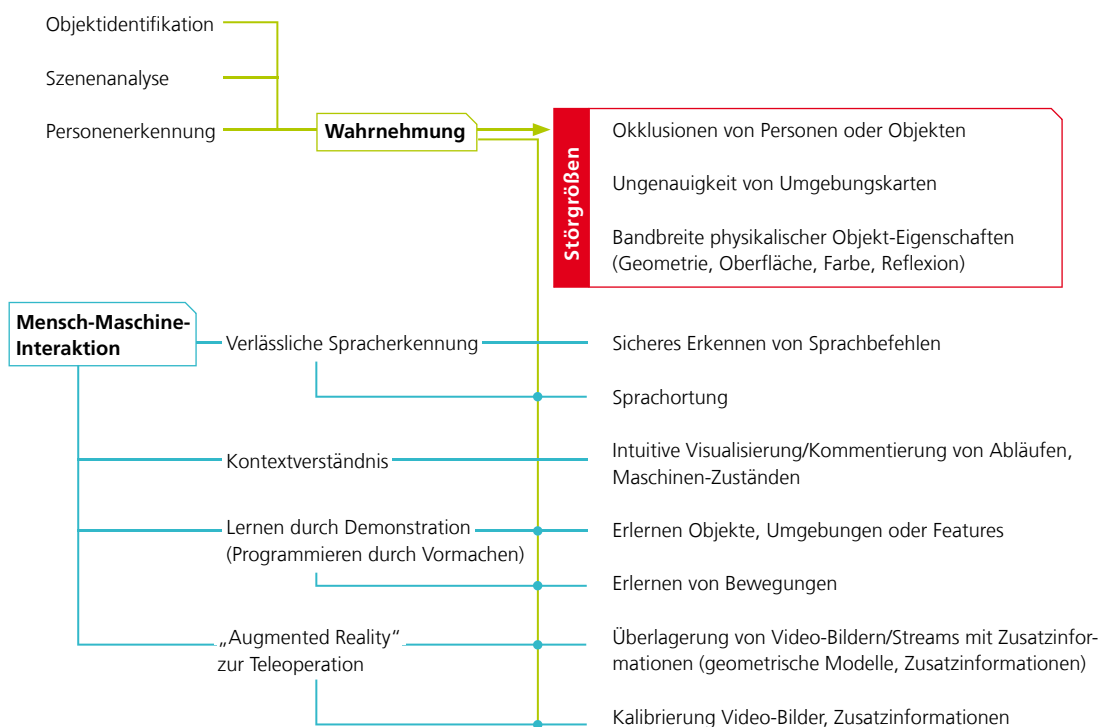


Abb. 4-3.5 Taxonomie der Mensch-Maschine-Interaktion in Serviceroboter-Anwendungen

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 3 FORSCHUNGSBEDARF FÜR BETRACHTETE SERVICEROBOTER-SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN

3 Forschungsbedarf für betrachtete Serviceroboter-Schlüsseltechnologien

Aufbauend auf der in [Kapitel 5.2](#) verwendeten Taxonomie der Serviceroboter-Schlüsselfunktionen werden diese in Bezug auf künftige zu erbringende Anforderungen hin untersucht und – soweit möglich – als Serviceroboter-Schlüsseltechnologien quantifiziert.

Hierzu werden Anforderungen aus den Serviceroboter-Szenarien (siehe entsprechende Functional Requirements in den FR-Diagrammen sowie den Steckbrief-Abbildungen) in Bezug zum Stand der Technik gesetzt. Die Diskrepanz zwischen dem geschätzten Stand der Technik und den identifizierten Anforderungen für die jeweiligen Schlüsseltechnologien ergibt den Forschungsbedarf.

Schlüsseltechnologie Wahrnehmung für indoor-Umgebungen

Tabelle 4-3.2 vergleicht die Funktionsanforderungen für die indoor-Wahrnehmung in Bezug auf Objektidentifikation, Szenenanalyse und Personenerkennung mit dem geschätzten Stand der Technik. Ersichtlich ist, dass für die Aufgabenausführung in typischen indoor-Szenarien, die auf die Verwendung von Roboterarmen (Manipulation) fußen, wie z.B. Bereitstellen von Pflegeutensilien, Bodenreinigung, Produktionsassistenz, eine Bandbreite von Wahrnehmungsfunktionen gleichzeitig erfüllt sein müssen. Die Funktionserfüllungen der Schlüsseltechnologien sind den u.U. gleichzeitig auftretenden Störgrößen ausgesetzt.

Die künftige Forschung und Entwicklung sollte demnach nicht nur auf die Erfüllung einzelner Funktionen oder Leistungsdaten abzielen, sondern auf die Bewältigung definierter Test-Cases bzw. Benchmark-Szenarien einschließlich wirkender Störgrößen (siehe auch die Maßnahmen zu „Benchmarking“ in [Kapitel 5.4](#)).

Schlüsseltechnologie	Anforderungskriterium	Szenariobeispiele	Anforderung	Stand der Technik
Objektidentifikation	Identifikation Anzahl (Alltags-)Objekte	Bereitstellen von Pflegeutensilien: Pflegeartikel erkennen und Bestandsdaten abgleichen, Bodenreinigung: Typische Objekte in der Büroumgebung erkennen, Produktionsassistenz: Werkstücke erkennen und Bestandsdaten abgleichen	Mehrere 100 bis 1 000	< 100
	Identifikations- / Erkennungsrate von (Alltags-)Objekten unter Alltagsbedingungen	Bereitstellen von Pflegeutensilien: s.o., Bodenreinigung: s.o., Produktionsassistenz: s.o. unter Alltagsbedingungen	> 90%	< 90%
	Geschwindigkeit Objektidentifikation	Produktionsassistenz: Werkstücke ohne Workflow-Unterbrechung erkennen, z.B. pro komplexe Szene mit ca. 20 verschiedenen Objekten	< 1 s / Szene	ca. 3 - 5 s / Szene, (mittelkomplex, ca. 10 - 20 Objekte) / Objekt

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 3 FORSCHUNGSBEDARF FÜR BETRACHTETE SERVICEROBOTER-SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN

Schlüsseltechnologie	Anforderungskriterium	Szenariobeispiele	Anforderung	Stand der Technik
Szenenanalyse	Unterscheidungs-, Lokalisierungsrate	Bereitstellen von Pflegeutensilien, Produktionsassistent, Bodenreinigung: Diskriminierung von Objekten untereinander, vor Hintergrund oder Schatten	> 90%	< 90% in Alltagsumgebungen
	Semantische Szenenanalyse (z.B. Tische, Stühle, Eimer)	Bereitstellen von Pflegeutensilien: Objekte in vollem Regal erkennen, Bodenreinigung: Objekte erkennen / unterscheiden	Erkennungsrate, und Klassifikation quasi 100% von > 20 Objekten	Erkennungsrate und Klassifikation << 100% bei in Szenarien mit ca. 20 Objekten
Personenerkennung	Gesichtserkennung zur Nutzerauthentifizierung	Containertransport, Bereitstellen von Pflegeutensilien: Verhindern unbefugter Nutzung	Quasi 100% Erkennungsrate unter Alltagsbedingungen	< 100% Erkennungsrate unter reproduzierbaren Aufnahmebedingungen
	Differenzierung von Personen / Körperteilen und Objekten / Werkstücken	Produktionsassistent: Sicheres kooperierendes Arbeiten mit Menschen	100% Unterscheidungs-, Erkennungsrate von bewegten Körperteilen unter Alltagsbedingungen	< 100% Erkennungsrate unter reproduzierbaren Aufnahmebedingungen
	Gestenerkennung und -interpretation	Produktionsassistent: Ermöglicht dem Menschen intuitive Steuerung des Serviceroboters, erhöht Akzeptanz, verringert Einlernzeit	100% Erkennungsrate von Standard-Gesten (z.B. Zeigegesten) unter Alltagsbedingungen	< 100% Erkennungsrate unter reproduzierbaren Aufnahmebedingungen, starke Abhängigkeit von der Komplexität der Geste.

Tab. 4-3.2 Schlüsseltechnologien Wahrnehmung für indoor-Umgebungen

Schlüsseltechnologie	Anforderungskriterium	Szenariobeispiele	Anforderung	Stand der Technik
Objektidentifikation	Identifikation, Lokalisierung natürlicher Objekte	Milchviehwirtschaft: Zitzen erkennen, Bodenfrüchteernte: Früchte nach Reifegrad auswählen	Automatische Bestimmung geeigneter Merkmale zur Objektmodellierung.	Lokalisierung auf der Basis von anwendungsspezifisch definierten Merkmalen aktive Beleuchtung (Engineering-Aufwand)
	Unterscheidungs- und Lokalisierungsrate Fremdobjekte von outdoor-Umgebungen	Außenanlagenwartung: Äste oder Alltagsobjekte vor Vegetation	> 90%	< 90% Unterscheidungs- und Lokalisierungsrate
	Kontexterkennung Alltagsobjekte in outdoor-Umgebungen	Außenanlagenwartung: Erstellung einer semantischen Karte der Inspektionsumgebung	Funktionen von lokalisierten Objekten erkennen und speichern	Funktionen werden nur bei bekannten (eingelernten) Objekten erkannt

Tab. 4-3.3 Schlüsseltechnologien Wahrnehmung für outdoor-Umgebungen

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 3 FORSCHUNGSBEDARF FÜR BETRACHTETE SERVICEROBOTER-SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN

Schlüsseltechnologie Wahrnehmung für outdoor-Umgebungen

Die Anforderungen an Schlüsseltechnologien „Wahrnehmung für outdoor-Umgebungen“, Tabelle 4-3.3, stützen sich in EFFIROB auf drei Szenarien: Milchviehwirtschaft, Außenanlagenwartung und Bodenfrüchteernte und sind demnach nur eingeschränkt repräsentativ für die Bandbreite möglicher outdoor-Serviceroboter-Anwendungen.

Wesentliche Anforderungen sind hier die Erkennung natürlicher und künstlicher Marken zur Lagestützung sowie die Hindernis-Erkennung der outdoor-Navigation unter Alltagsumgebungsbedingungen (Licht, Witterung etc.), ggf. auch unter künstlicher Beleuchtung. Wie im obigen Fall der indoor-Wahrnehmung sollte eine künftige Forschung und Entwicklung neben der Erfüllung einzelner Funktionen oder Leistungsdaten auf die Bewältigung definierter Test-Cases

bzw. Benchmark-Szenarien einschließlich wirkender Störgrößen abheben.

Schlüsseltechnologie Navigation

Fünf der 11 betrachteten Szenarien basieren auf der Schlüsseltechnologie „indoor-Navigation“, eines auf „outdoor-Navigation“, siehe Tab. 4-3.3. Die wesentlichen, in Expertengesprächen stets betonten Praxisanforderungen sind zum einen die Verfügbarkeit der Fahrzeugortung auch bei auftretenden Störgrößen wie unvermeidlichen Abweichungen der Ist-Umgebung gegenüber einprogrammierten Umgebungskarten, zum anderen die verlässliche Reaktion auf Hindernisse (zügiges Umfahren bzw. Hindernisvermeidung). Forschungsbedarf wird hier insbesondere in Bezug auf Robustheitssteigerung von anwendungsübergreifend einsetzbaren Navigationskomponenten gesehen.

Schlüsseltechnologie	Anforderungskriterium	Szenariobeispiele	Anforderung	Stand der Technik
Ortungsgenauigkeit indoor	Verfügbarkeit der Ortung in (unpräparierten) Alltagsumgebungen	Pflegeszenarien, Containertransport: Fahrzeug findet selbständig Weg zu seiner Basisstation bei Nichtgebrauch, Passieren enger Passagen (Türen, Durchfahrten etc.)	Verfügbarkeit Ortungsgenauigkeit 2 cm bei quasi 100% des Betriebs, selbstständige Verfeinerung der Karten (SLAM)	Ortungsgenauigkeit abhängig von Kartenqualität, ca. 2 cm
Bahnplanung indoor	Robuste Bahnplanung in dynamischen, geom. beschränkten Alltags-Umgebungen	Pflegeszenarien, Containertransport: Sichere Bewegungsführung zwischen Menschen, Hindernissen (belebte, hochfrequentierte Umgebung)	Verlässliches autonomes Fahren: Verfügbarkeit quasi 100% (24 / 7) in Alltagsumgebungen	Verfügbarkeit < 99% in Alltagsumgebungen; abhängig von Erfahrung und Sorgfalt der Einrichtung
	Geschwindigkeit der Bahnplanung, Reaktion auf dynamische Umgebungsänderungen	Pflegeszenarien, Containertransport: Sichere Bewegungsführung zwischen Menschen, Hindernissen	Sichere, flüssige Reaktion im ms-Bereich in < 1 s auf unvorhergesehene Störungen (sichere Hindernisumfahrung)	Reaktion auf unvorhergesehene Störungen (Kollisionsvermeidung), sichere Hindernisvermeidung (Stopp)
Ortungsgenauigkeit outdoor	Verfügbarkeit Ortung (ohne DGPS) unter schwankenden Lichteinflüssen	Außenanlagenwartung: Höhere Wetterunabhängigkeit des Ortungssystems (z.B. starke Wolkendecke, Bewölkung)	Verfügungsrate der Ortungsgenauigkeit < 10 cm ohne DGPS > 90% unter Alltags-outdoor-Bedingungen (Schnee, Laub, Nässe)	Verlässlichkeit Ortungsgenauigkeit 10 cm ohne DGPS: << 100% in typischen outdoor-Umgebungen

Tab. 4-3.4 Schlüsseltechnologien Navigation

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 3 FORSCHUNGSBEDARF FÜR BETRACHTETE SERVICEROBOTER-SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN

Schlüsseltechnologie Manipulation

Herausforderungen in Forschung und Entwicklung für die Schlüsseltechnologie Manipulation (Tabelle 4-3.5) zielen auf:

- Die mechanischen Eigenschaften des Arms als wesentliche Funktionskomponente und auch Hauptkostenträger der Servicerobotik (vgl. *Kapitel 4.2.3*),
- die Armsteuerung in Bezug auf Bewegungsplanung und -führung, insbesondere unter Maßgabe der Synchronisierung mit mobilen Plattformen,

- die rasche und verlässliche Planung und Steuerung von Griffen für die Bandbreite typischer Alltagsobjekte. Diese Funktionsanforderungen sind wiederum eng mit Funktionen der Objektidentifikation und Szenenanalyse unter Alltagsbedingungen verknüpft.

Schlüsseltechnologie	Anforderungskriterium	Szenariobeispiele	Anforderung	Stand der Technik
Kollisionsfreie Arm- bewegung	Bahnplanung (Generierung von Sample-Points, Smoothing, Kollisionscheck) für typische Bahn mit 50 – 200 Knoten mittels dynamischer Umgebungsmodelle	Bereitstellen von Pflegeutensilien, Produktionsassistenz: Armbewegung vergleichbar schnell wie Mensch erspart Umgewöhnung, erhöht Akzeptanz	Trajektorien-generierung in Alltagsumgebungen (mit Hindernissen) < 1 s	Trajektorien-generierung in Alltagsumgebungen (mit Hindernissen) < 1 s
Synchrone Arm- und Plattformbewegung	Koordination redundante kinematische Kette (mobile Plattform – Arm – Greifer)	Bereitstellen von Pflegeutensilien: Anreichen von Objekten während der Fahrt, Bodenreinigung: Öffnen Türen, verschieben von Objekten bzw. Hindernissen	Unter geometrischen Zwangsbedingungen (Hindernissen) Bahnfehler am Endeffektor << 1 cm; Sync-Takt der Plattform- / Armbewegung < 10 ms	Bahnfehler der Endeffektorbewegung ca. 1 cm unter geometrischen Zwangsbedingungen; Synchronisationstakt Plattform- / Armbewegung < 50 ms
Spektrum greifbarer Objektgrößen, -formen	Greifen von Objekten unterschiedlicher Beschaffenheit bzgl. Größe, Stabilität, Gewicht etc.	Bereitstellen von Pflegeutensilien: Flexibilität bei der Verwendung von Pflegeutensilien, Bodenreinigung: Beseitigung oder Versetzen von Hindernissen	Kompakte Greifer mit umfangreichem Greifvermögen bzgl. Größe / Form: z.B. von Streichholzschachtel bis zum Durchmesser einer 1,5l-PET-Flasche	Greifer können nur ein enges, vordefiniertes Spektrum an Objekten aufheben; Greifspanne ist dabei typischerweise < 1,5 * Greiferbreite
Schnelles Greifen	Bestimmung stabiler Griff bei lokalisiertem und erkanntem Alltagsobjekt	Bereitstellen von Pflegeutensilien: Greifen von Arbeitsobjekten, Bodenreinigung: Hindernisverschiebung, Bodenfrüchteernte: Greifen der Früchte	Greifgeschwindigkeit vergleichbar zu der des Menschen für Alltagsobjekte (ca. < 4 s für Griff)	> 4 s für Greifplanung an komplexem Objekt

Tab. 4-3.5 Schlüsseltechnologien Manipulation

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 3 FORSCHUNGSBEDARF FÜR BETRACHTETE SERVICEROBOTER-SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN

Schlüsseltechnologie Mensch-Maschine-Interaktion

Schlüsseltechnologien der Mensch-Maschine-Interaktion stehen in dieser Studie aufgrund der vergleichsweise scharf umrissenen Aufgaben der vorgestellten Serviceroboter-Szenarien nicht im Vordergrund. Belehrung, Programmierung und Aktivierung der Roboter sowie die physische Interaktion im Sinne einer arbeitsteiligen Aufgabenausführung sind demnach, zumindest für die nominale Aufgabenausführung, weitgehend vorgezeichnet (siehe die Sequenzdiagramme der Steckbriefe). Diese Situation ist jedoch nicht übertragbar auf die bekannten, im Allgemeinen komplexeren Szenarien von Haushaltsassistenten (wie z.B. bei dem Care-O-bot-Experiment), in denen die intuitive Mensch-Maschine-Interaktion technologisch im Vordergrund steht. Folgende Aussagen lassen sich aus Tabelle 4-3.6 ableiten:

- Verlässliche Spracherkennung von Schlüsselwörtern als intuitive Benutzerschnittstelle in Alltagsumgebungen

ist in zahlreichen Umgebungen (Auto, Büroarbeitsplatz) erfolgreich eingeführt – in der Robotik allerdings meist aufgrund der eingeschränkten Sprecherlokalisierung bislang nicht gängig.

- Ein wesentlicher Beitrag zur Teleoperation wird im Einsatz von Augmented-Reality-(AR)-Technologien gesehen. Neben dem typischen AR-Einsatz zur Inspektion und zur Arm- oder Fahrzeugführung z.B. im Szenario Außenanlagen, eignen sich AR-Technologien für die Ad-hoc-Unterstützung von Serviceroboter-Systemen in Grenzsituationen oder Versagensfällen. So können bei verfehlter Objekterkennung, „Steckenbleiben“ der mobilen Plattform oder bei nicht erfolgreicher Greifplanung Personen über einfache Benutzerschnittstellen „on-line“ Fehlerzustände lösen und die Verfügbarkeit der Anwendung erhöhen. Diese als „Shared-Autonomy“ bezeichneten Interaktionen wurden bereits dokumentiert.⁷ Insbesondere für Ausrüster und Betreiber können diese, wie Call-Center („Klick-Worker“) betriebene Servicestationen ein interessantes Mittel sein, Verfügbarkeiten von Anwendungen zu erhöhen.

Schlüsseltechnologie	Anforderungskriterium	Szenariobeispiele	Anforderung	Stand der Technik
Verlässliche Spracherkennung in Alltagsumgebungen	Sicheres Erkennen von Sprachbefehlen	Produktionsassistent: Ermöglicht dem Menschen, Instruktionen ohne Verwendung der Hände zu geben	Erkennungsquote Schlüsselwörter in Alltagsumgebungen, wie z.B. in Fertigungsumgebungen > 90%	Erkennungsquote von Schlüsselwörtern in Fertigungsumgebungen < 90% über Kehlkopfmikrofon
Lernen durch Demonstration	Erlernen von Objekten, Umgebungen oder Features	Bereitstellen von Pflegeutensilien, Kanalinspektion	Einmaliges Demonstrieren von Objekten, Umgebungen oder Features	Einlernen von Objekten über CAD-Modelle oder Abläufe / Handlungen über Skripte
Augmented Reality zur Teleoperation	Unterstützung bei der Aufgabenausführung und Wartung	Außenanlagenwartung	Taktils Display, 3-D-Graphik zur Bedienung durch Anwendungsexperten	Kombination taktils Display, 3-D-Graphik zur Bedienung durch Roboter-Experten

Tab. 4-3.6 Schlüsseltechnologie Mensch-Maschine-Interaktion

⁷ Bosch Selected to Participate in Willow Garage's PR2 Beta Program; Pressemitteilung 14. Juni 2010; http://www.bosch-press.com/tbwebdb/bosch-usa/modules/oragetblob.dll/PR%20Beta2%20Program.pdf?db=TBWebDB_rbn&item=TBWebDB_texpdf&id=418,1&dispo=a

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 4 FORSCHUNGSBEDARF IN BEZUG AUF EIN EFFIZIENTES SYSTEMS ENGINEERING FÜR SERVICEROBOTER-ANWENDUNGEN

4 Forschungsbedarf in Bezug auf ein effizientes Systems Engineering für Serviceroboter-Anwendungen

Der Serviceroboter-Markt der Zukunft wird zunehmend durch Ausrüster geprägt sein, die keine (Industrie-)Roboter-Hersteller sind und den Aufbau kostenintensiver Ressourcen in der Robotik vermeiden werden. Für diese, meist auf spezialisierte Maschinen und Lösungen fokussierte Ausrüsterindustrie müssen folglich Technologien und Methoden bereitgestellt werden, so dass der Serviceroboter-Entwicklungsprozess bei minimalen Risiken geleistet werden kann. In diesem Zusammenhang wurden in dieser Studie drei Forschungsaufgaben identifiziert:

Repositories und Werkzeuge zur Wiederverwendung von Software-Komponenten

Bestehende Initiativen wie das EU-Projekt BRICS⁴ zielen u.a. auf die Systematisierung und Vereinfachung des Entwicklungsprozesses von Serviceroboter-Anwendungen durch anwendungsübergreifend einsetzbare Systemarchitekturen, Middleware, Entwicklungswerkzeuge und Komponenten ab. Von zentraler Bedeutung ist hier die Verfügbarmachung der Komponenten, zum Beispiel über „open-source“-Repositories von Serviceroboter-Schlüsselfunktionen.

Dennoch ist davon auszugehen, dass selbst bei hohem Wiederverwendungsgrad bestehender Software-Module der Aufwand und das Entwicklungsrisiko für Serviceroboter-Anwendungen unterschätzt werden. Demnach sollte der Entwicklungsprozess von der Spezifikation, über Funktionsentwicklungen, Integration, Test und Optimierung planbar und inhaltlich leistbar sein.

Ein sinnvoller Weg aus diesem Dilemma erscheint der verstärkte Einsatz kooperativer Ansätze, die die Wiederverwendung bestehender, den Anwendungsanforderungen gerecht werdender Software für die Servicerobotik ermöglicht und ermutigt. Maßnahmen in diese Richtung könnten sein:

- Förderung von Software-Paradigmen, die auf die Erstellung wiederverwendbarer Software-Komponenten ausgelegt sind, wie z.B. Component Based Development oder Model Driven Engineering.
- Einrichten und Pflegen von Repositories für wiederverwendbare Software-Bestandteile.
- Erstellung von Standards und Richtlinien, die Entwicklungsvorgaben stabilisieren und Komponentenverknüpfung vereinfachen.

Methoden zur Software-Kostenschätzung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde versucht, Kosten für die Entwicklung von Software für Serviceroboter abzuschätzen, wobei lediglich Informationen über gewünschte grundlegende Funktionalitäten bekannt waren. Zentrales Problem derartiger Schätzungen ist die hohe Ungenauigkeit, die aus der unsicheren Datenlage über die zu erstellende Software resultiert.

In etablierten Bereichen der Software-Branche, z.B. Betriebssystementwicklung, mildert man diesen Umstand ab, indem man entweder auf Datenbanken mit umfangreichen Informationen über Tausende von abgeschlossenen Software-Projekten oder auf personengebundenen Expertenwissen zurückgreift. Diese Möglichkeit ist aber nur in beschränktem Umfang für die Servicerobotik nutzbar, da derartige Datenbanken speziell für Software-Projekte der Robotik nicht existieren.

Auch wenn die Schätzungen, die in dieser Studie vorgenommen wurden, mit hoher Ungenauigkeit behaftet sind, so scheint zumindest die Erkenntnis sicher, dass der Anteil der Software-Entwicklung an den Gesamtkosten für den Aufbau eines Serviceroboters erheblich ist (siehe [Kapitel 4.3.2](#)) und Tabelle 4-2.3.



FORSCHUNGSBEDARFE

→ 4 FORSCHUNGSBEDARF IN BEZUG AUF EIN EFFIZIENTES SYSTEMS ENGINEERING FÜR SERVICEROBOTER-ANWENDUNGEN

Um Herstellern und Systemintegratoren für Servicerobotik mehr Planungssicherheit zu vermitteln und somit auch den Markteintritt zu erleichtern, erscheint es daher ratsam, die öffentliche Bereitstellung geeigneter Methoden und Erfahrungswissen zur effizienten Software-Entwicklung in der Servicerobotik zu fördern.

Benchmarking zur Spezifikation von Schlüsseltechnologien

Eine Methode zur technischen und wirtschaftlichen Konzeption und Machbarkeitsbewertung von Serviceroboter-Anwendungen wurde in [Kapitel 2.2](#) und [Kapitel 2.3](#) vorgestellt. Merkmal der Methode ist die parallele Dekomponierung der durch das Szenario gegebenen Funktionen parallel zur Lösungsentwicklung durch entkoppelte und realisierbare Lösungsmodule (in HW und SW). Dies erfordert verfügbare

und umfassend spezifizierte Lösungsmodule für z.T. komplexe Schlüsselfunktionen. Diese Spezifizierung ist im Fall von Schlüsselkomponenten, die Leistungsdaten unter einer Bandbreite stochastischer Störgrößen erfüllen müssen, praktisch ausschließlich experimentell möglich.

Diese systematische experimentelle Evaluierung der Schlüsselfunktionen anhand von Test-Cases, die sich auf Anforderungen typischer Szenarien beziehen, ist aktuell in der Robotik ein intensiv diskutiertes Thema und sollte verstärkt Forschungsgegenstand sein:

- Eine Methodik zur Spezifikation von Test-Cases unter Maßgabe realistischer Abbildung szenarien-übergreifender Anforderungen und Einflussgrößen.
- Definition und systematische Durchführung von Test-Cases und Benchmarks zur Spezifizierung und Qualifizierung untersuchter Schlüsseltechnologien.

FORSCHUNGSBEDARFE

→ 5 ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG DER FORSCHUNGSBEDARFE

5 Zusammenfassende Beurteilung der Forschungsbedarfe

Folgende Kernbotschaften zu den Forschungsbedarfen zur weiteren Erschließung des Zukunftsmarkts „Serviceroboter“ lassen sich aus der Bewertung der untersuchten Serviceroboter-Schlüsseltechnologien und Systementwicklungsmethoden ableiten:

Identifizierte Forschungsbedarfe im Bereich der Schlüsseltechnologien ergänzen aktuelle Roadmaps und Forschungsinitiativen.

Die Formulierung einer Technologie-Roadmap war nicht das Studienziel. Dennoch erfolgte die Darstellung der Serviceroboter-Schlüsseltechnologien auf der Basis von Technologie-Taxonomien und Glossaren aktueller Roadmaps und Positionspapieren der Robotik.^{8,9} Folgende wesentliche inhaltliche Unterschiede zu den zitierten Roadmaps lassen sich anführen:

- Da die untersuchten Szenarien auf scharf umrissenen Aufgaben mit weitgehend festen Abläufen fußten, wurde die Analyse von Schlüsseltechnologien der kognitiven Robotik (maschinelles Lernen, Rasonieren, automatische Planung von Handlungen) in dieser Studie weitgehend ausgeklammert.
- Anstatt 18 (EUROP SRA) bzw. 17 (CCC Study) Technologiefelder fokussiert diese Analyse des Forschungsbedarfs auf 4 Technologiefelder: Wahrnehmung, Navigation, Manipulation und Mensch-Maschine-Interaktion.
- Maßnahmen zur Effizienz- und Erfolgssteigerung des Serviceroboter-Entwicklungsprozesses, insbesondere aus Sicht der Ausrüster wurden bislang in keiner Roadmap näher untersucht. Im BMBF-Projekt DESIRE wurde diese Herausforderung aufgegriffen und im EU-FP7 IP BRICS

umfassend angegangen.¹⁰

- Eine zeitliche Skalierung oder eine Ressourcenschätzung zur Erreichung der Forschungs- und Entwicklungsziele wurde in dieser Studie nicht unternommen.

Die Wahrnehmung ist die zentrale Basistechnologie in der gewerblichen Servicerobotik, die mit anderen Technologien in Abhängigkeit steht.

- Da Verbesserungen in der Wahrnehmung vielverzweigte Auswirkungen in anderen Basistechnologien der Robotik haben (z.B. Navigation, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion), sollten Forschungsanstrengungen in die Richtung gelenkt werden, zukünftig schneller, zuverlässiger und in größerer Anzahl Objekte wahrnehmen zu können.
- Verfügbarkeitsanforderungen der Serviceroboter-Einsätze von praktisch 100% sollten, aufgrund der großen Bandbreite möglicher wirkender Störgrößen, den Schwerpunkt auf die Entwicklung besonders robuster Verfahren legen. Unsicherheitsbehandlung in der Erkennung von Objekten, Umgebungen und Personen kann auf Basis von Verfahren zur Nutzung einer „Shared Autonomy“ (d.h. Assistenz durch den Menschen bei erkannter Unsicherheit oder Fehlerzustand) abgefangen werden.
- Metriken und Benchmarks für die Entwicklung und Spezifikation von Wahrnehmungs-Schlüsseltechnologien sollten im Kontext von Test-Szenarien erfolgen, die stellvertretend für typische Anwendungsanforderungen sind.

Robustheit in Bezug auf die Schlüsseltechnologie „Navigation“ (Selbstlokalisierung, Bahnplanung, Hindernisumfahrung) ist zentrale Anforderung seitens Ausrüster und Anwender.

- Die Bewertung der Robustheit der Navigation mobiler Roboter ist aus Forschungs- und Ausrüstersicht divergent. Auch

⁸ Strategic Research Agenda for Robotics in Europe (EUROP SRA): Robotic Visions to 2020 and beyond; presented on July 7, 2009; <http://www.robotics-platform.eu/cms/index.php?idcat=26>

⁹ CC Study on Robotics: A Roadmap for US Robotics From Internet to Robotics; presented on May 21, 2009; <http://www.us-robotics.us/reports/CCC%20Report.pdf>

¹⁰ Projekt DESIRE (Deutsche Servicerobotik Initiative); <http://www.servicerobotik-initiative.de/multimedia/bilder/> und FP7 IP BRICS Best of Robotics, Grant Number 231940; <http://www.best-of-robotics.org>



FORSCHUNGSBEDARFE

→ 5 ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG DER FORSCHUNGSBEDARFE

hier sollten Metriken und Benchmarks zur systematischen Evaluierung und Spezifizierung von Schlüsseltechnologien der Navigation etabliert werden.

- Um die Navigation von autonom mobilen Servicerobotern zu verbessern, sollte die Robustheit von Bahnplanung und Selbstlokalisierung erhöht werden, um die Anfälligkeit gegenüber dynamischen Störgrößen, wie sie im Betriebsalltag vorzufinden sind (z.B. wechselnde Lichtverhältnisse, Witterung) zu senken.

Robustes Greifen von Werkstückspektren und Alltagsobjekten stehen bei der Manipulation im Vordergrund.

- Die Fähigkeit zur physischen Interaktion mit Objekten (Manipulation) ist eine Schlüsseltechnologie für die Erschließung neuer Serviceroboter-Anwendungsfelder. Das Greifen von Objekten ist dabei eine typische leistungsbestimmende Querschnittsanforderung, daher sollten Verbesserungen in Greifgeschwindigkeit (Greifplanung) und Griffvariabilität (Anzahl der verschiedenen greifbaren Objektformen) angestrebt werden.
- Greifunsicherheiten sind zu detektieren und ggf. interaktiv mittels Shared-Autonomy abgefangen werden.

Verbesserte und sichere Mensch-Maschine-Interaktion erhöht Einsatzeffizienz und Nutzerakzeptanz.

- Verlässliche Spracherkennung ist zur intuitiven Bedienung in mehreren dargestellten Szenarien fast unabdingbar. Die aktuell gängige Nutzung von Kehlkopfmikrofonen hemmt den Bedienkomfort. Robuste Spracherkennung in Arbeits- oder Fabrikumgebungen mit Erkennungsraten ähnlich denen beim Einsatz von Kehlkopfmikrofonen sollte angestrebt werden.
- Bei Fehlverhalten oder Versagen des Roboters muss der Mensch eine unkomplizierte Möglichkeit haben, den Roboter wieder zur erwünschten Funktionsweise überführen zu können, andernfalls wäre die Akzeptanz der Robotiklösung gefährdet. Ein dargestellter, die Robustheit steigernder

Ansatz ist die Shared Autonomy (s.o.), die die Teleoperation des Roboters von Computern (ggf. durch Call-Center) oder von Mobiltelefonen aus gestattet.

- Gegenwärtige Sicherheitstechnologien für Roboter ohne Schutzbarrieren lassen in der Regel nur langsame Bewegungen zu. Dies ruft den Eindruck eines trägen Systems hervor und reduziert die Nutzerakzeptanz oft erheblich. Forschungsbemühungen sollten daher in die Richtung gelenkt werden, höhere Bewegungsgeschwindigkeiten von Servicerobotern bei gleichbleibend strengen Sicherheitsanforderungen zu ermöglichen.

Effizientes Software-Engineering für Serviceroboter-Anwendungen

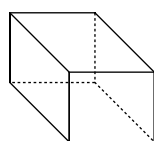
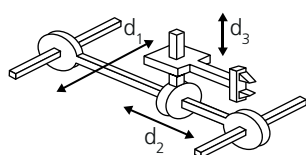
- Die Entwicklung von Software verursacht signifikante Kosten bei den Herstellern und Integratoren von Servicerobotern. Dem ließe sich entgegenwirken, indem öffentliche Repositories mit standardisierten und wiederverwendbaren Komponenten zur Verfügung gestellt und gefördert werden, um durch kooperative Bearbeitung Software-Entwicklungskosten einzudämmen.
- Um Herstellern und Systemintegratoren für Servicerobotik mehr Planungssicherheit zu vermitteln und somit auch den Markteintritt zu erleichtern, besteht ein Bedarf an Werkzeugen und Methoden zur Kostenschätzung und zum Controlling der Software-Entwicklung in der Servicerobotik.
- Die anwendungsübergreifende (Wieder-)Verwendung von Komponenten erfordert einen sorgfältigen Spezifizierungsprozess zur Minimierung von Entwicklungskosten und -risiken. Die systematische experimentelle Evaluierung der Schlüsselfunktionen anhand von Test-Cases, die sich auf die Anforderungen typischer Szenarien beziehen, sollte verstärkt Forschungsgegenstand sein.

KINEMATIK-KATALOG

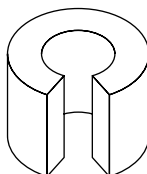
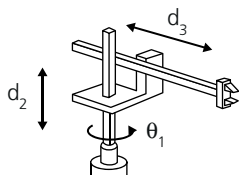
Roboter-Standardkinematiken (Hauptachsen)

Kartesischer Aufbau

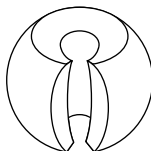
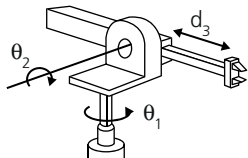
Arbeitsraumform



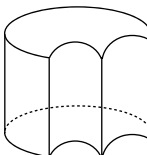
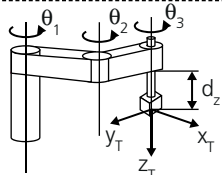
Zylindrischer Aufbau



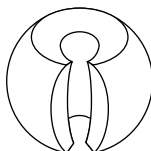
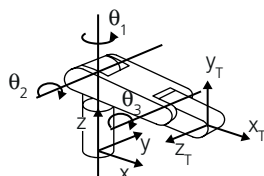
Sphärischer Aufbau



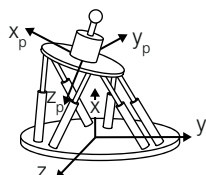
Horizontaler Knickarmroboter (SCARA)



Vertikaler Knickarmroboter

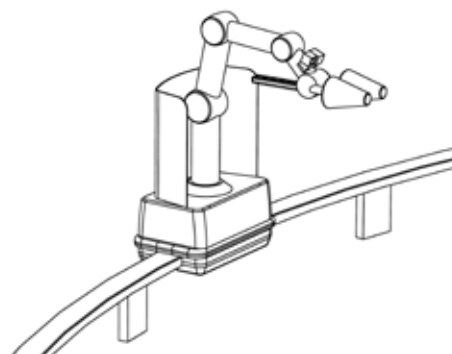


Parallelkinematik (Stewart-Plattform)

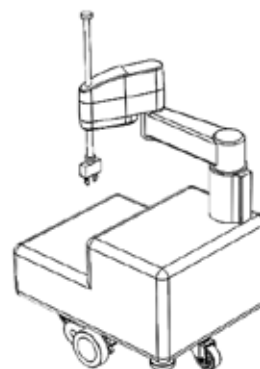


Kombinierte Kinematiken

Vertikaler Knickarm auf Linearachse




SCARA auf mobiler Plattform



Vertikaler Knickarmroboter auf mobiler Plattform



KOMONENTENKATALOG

Kriterium	Industrie-Roboter						Armmodule		Kleinroboter	
	Horizontaler Knickarmroboter		Portalroboter und kartesische Roboter		Vertikaler Knickarmroboter		Pneumatische Linearmodule	Elektrische Drehmodule	Roboter für sichere Kooperation	Leichtbauroboter
Traglast [kg]	< 5	< 10	< 50	< 500	< 10	< 200	~ 5	~ 5	4	7
Freiheitsgrade [DOF]	4	4-5	3-6	3-6	5-6	6	1	1	6	7
Wiederholgenauigkeit [mm]	0,01	0,01	0,1	0,3	0,05	0,06	< 5	0,1	0,05	0,05
Sensor-Führung	✓		✓		✓				✓	✓
Typische Reichweite [m]	0,5	1	in weitem Bereich variabel		2,5	3	1,5	1,2	0,75	1,2
Kosten [T€]	20	25	50	100	30	60	2/DOF	5/DOF	50	100
Ausführungsbeispiel	Adept Cobra 800		REIS RL		KUKA KR 180-2		Shadow-Air-Muscle 200	Schunk ERB 110 Powerball	KUKA KR5 Si	KUKA LBR 4+
										

Kriterium	Backengreifer				Fingergreifer	
	Pneumatisch		Elektrisch		Elektrisch 7 DOF (3 Finger)	Pneumatisch > 7 DOF (anthropomorph)
Greifkraft [N]	< 250	< 1 500	< 200	< 2 000	20	5
Kosten [T€]	< 1	< 2	< 1	< 8	50	75
Integrierbare Sensoren	optisch / taktil		optisch / taktil		taktil / Vision	taktil / Vision
Ausführungsbeispiel	Schunk KTG		Schunk PG 70		Schunk SDH	Shadow C5
						



01

02

03





04








05

06

07

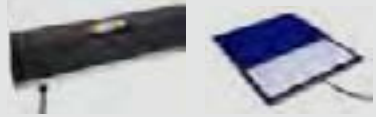




KOMponentenkatalog

Kriterium	Nicht-holonome Fahrwerke				Holonome Fahrwerke							
	Differential asymmetrisch		Differential symmetrisch		Mecanum-Rad		Vollgelenkte Räder					
Zuladung [kg]	< 50	< 250	< 50	< 250	< 300	< 3 000	< 50	< 250				
Typische Diagonale [m]	1	2	1	2	1,5	2,9	1,5	2				
Autonome Navigation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
Kosten [T€]	20	25	45	65	25	35	45	75	75	180	50	200
Ausführungsbeispiel	Neobotix MP-S500		Neobotix MPM-470		KUKA omnimov R1		IPA Care-O-bot					
												

Kriterium	Berührungsfrei messende Sensoren							
	Laser			Optisch			Ultraschall	Radar
Technologie / Reflexion								
Dimensionen	1D	2D	2,5 / 3D	1D	2D	3D	1D	1D
Detektion	Punkt-Abstand	Linienprofil	Linienprofile/Flächenprofil	Abstand	ebenes Bild	räumliches Bild	Flächen-Abstand	Abstand, Geschwindigkeit
typ. Erfassungsbereich [m]	typisch < 15	< 80	< 200	< 10	5, abhängig von Optik	< 10	< 10	typisch: < 200
Genauigkeit	< 1%	10–50 mm	< 100 mm	1%	abhängig von Optik	< 20 mm	3%	< 0,25 m
Sicherheitsoption	✓	✓	✓	✓			✓	✓
Messrate (typisch)	< 1 kHz	< 0,1 kHz Scanfrequenz	50 Hz Scanfrequenz	< 1 KHz	<200 FPS	50 FPS	10 Hz	10
Kosten [T€]	0,1 – 2	0,3 – 5	50	0,5 – 2	0,5 – 5	1 – 10	0,1 – 1	
Ausführungsbeispiel	Leuze LPS 36	Sick LMS 500	ibeo LUX 8L (Prototyp)	Balluff BOD 63M	Kappa Kalypso 023-USB	Mesa SwissRanger SR4000	Microsonic CRM +	ContiARS 3XX
								



KOMponentenkatalog

Kriterium	Taktile und mechanische Sensoren					
	Erfassungsgröße	Druck (sicherheitsgerichtet)		Mechanischer Kontakt, Druckprofil		Moment / Kraft (integriert)
Dimensionen	Punkt / Linie	Fläche	Punkt	Fläche	1D	6D
Charakteristisches Messprinzip	Elektrischer Kontakt		Resistive Folie		DMS Technik	Optisch / mechanisch
Erfassungsbereich	genormt nach DIN/EN 1760 Sicherheit von Maschinen		1 – 1 000 N	20-250 kPa	typisch: < 1 000 N	typisch: < 20 Nm, 1 000 N
Genauigkeit [%]			5%		1%	
Kosten [€]	50	200	100	< 2 000	400	8 000
Ausführungsbeispiel	Haake Technik Schaltkettenleiste und Kontaktmatte		Taktile Sensoren beispielsweise des Fraunhofer ENAS	Weiss Robotics DSAMOD-5i	ME-Messsysteme KM 29	Schunk FT45-mini
						

Daten- und Kostennennungen in diesem Komponenten-katalog sind durch Mitteilung der Eigenschaften von typischen Produkten der jeweiligen Kategorie entstanden. Technische Daten und Kosten decken sich daher nicht mit den Ausführungsbeispielen.

SOFTWARE-KOSTENBEWERTUNGSTABELLE

Bezeichnung	Funktionen								function points
	extrovertiert				introvertiert				
Komponente	Navigation	Mani- pulation	Wahr- nehmung	Kommu- nikation	Modellie- rung	Planung	Lernen	Entwicklung	
ROS-Stack									
arm_navigation		•				•			69
arm_planning_control		•				•			24
articulation	•	•			•	•			247
camera_drivers			•					•	134
camera_umd			•	•					37
collision_environment	•		•						71
common	•	•	•	•	•	•	•	•	310
common_msgs	•	•	•		•			•	38
communication				•					12
cram					•	•	•		17
diagnostics								•	122
driver_common								•	33
executive_python								•	125
exploration	•		•		•	•			19
geometry					•	•		•	193
gps_umd	•			•					4
image_common			•					•	22
image_pipeline			•		•	•			87
image_transport_plugins			•	•				•	11
imu_drivers			•						18
joystick_drivers	•								240
kinematics					•	•			2
laser_drivers			•					•	34
laser_pipeline					•	•			35
machine_learning							•		8
manipulation_common		•							45
motion_planners	•	•				•			394
motion_planning_common	•	•				•			64
motion_planning_environment	•		•			•			122
motion_planning_visualization				•					17
navigation	•								257
octomap_mapping					•				7

>>



01

02

03

04

05

06

07

SOFTWARE-KOSTENBEWERTUNGSTABELLE

Bezeichnung	Funktionen								function points
Komponente	extrovertiert				introvertiert				
	Navigation	Mani- pulation	Wahr- nehmung	Kommuni- kation	Modellie- rung	Planung	Lernen	Entwicklung	
ROS-Stack									
physics_ode					•	•			3
point_cloud_perception			•						140
power_supplies								•	9
robot_calibration								•	95
robot_model					•				274
ros	•	•	•	•	•	•	•	•	3 410
ros_realtime								•	54
scan_tools			•						6
simulator_gazebo					•			•	718
simulator_stage					•			•	8
slam_gmapping					•		•		15
sound_drivers				•					22
topological_navigation	•					•			79
trajectory_filters	•	•				•			177
vision			•						360
vision_opencv			•						36
visual_feature_detectors			•						244
visualization				•				•	385
visualization_common								•	66
vslam					•		•		305
web_interface				•					2 449
wifi_drivers				•					48



EFFIROB GLOSSAR

Begriff	Definition
Arbeitswissenschaftliche Begriffe	
Arbeitssystem	dient der Erfüllung einer Arbeitsaufgabe. Es wird nach REFA durch Arbeitsablauf, Eingabe, Ausgabe, Mensch, Betriebs- bzw. Arbeitsmittel und Umwelteinflüsse beschrieben. ¹¹ Die formale Struktur eines Arbeitssystems ist in Abbildung 2-2.1 gegeben.
ATAA	Das Instrument zur Analyse von Tätigkeitsstrukturen und zur vorausschauenden Arbeitsgestaltung bei Automatisierung ATAA ist ein qualitatives, empirisches Verfahren zur Analyse der Strukturen und Inhalte von Tätigkeiten und Qualifikationsanforderungen, insbesondere für den Einsatzbereich von automatisierten oder zu automatisierenden Fertigungen. ¹² Das ATAA-Verfahren bezieht sich auf die jeweiligen Arbeitsaufgaben, die an einem Arbeitsplatz bzw. in einer Arbeitsgruppe durchzuführen sind. Das Verfahren basiert auf der Aufzeichnung der Arbeitsplatzanforderungen durch Fragebogen bzw. durch Beobachtung der Tätigkeit nach vorgegebenen Handlungsarten.
Dienstleistung	Dienstleistungen sind im Kontext dieser Studie Tätigkeiten, die nicht der industriellen Erzeugung von Gütern, sondern der Verrichtung von Leistungen an Menschen und Einrichtungen dienen. ¹³ Diese Tätigkeiten werden entweder vermarktet oder von der Allgemeinheit getragen und führen zu Ergebnissen mit überwiegend immateriellem Charakter.
Primitiv	Aufgaben können in Elementarfunktionen zerlegt werden, die eine charakteristische Funktion umfassen. Primitive sind hier als gemeinsamer Satz von Elementarfunktionen der manuellen und der automatisierten Aufgabenausführung durch Roboter zu sehen. Die Implementierung auf der Robotersteuerung erfolgt typischerweise durch ein Software-Modul, das eine standardisierte Schnittstelle zwischen diskreter Planung und Ausführung bildet. ¹⁴ Es wird unterschieden nach: <ul style="list-style-type: none"> • Wahrnehmungprimitive erfüllen eine Erkennungsfunktion. Resultate sind beispielsweise bei Objekten die Lokalisierung, Identifizierung oder Maßbestimmung sowie bei relativen Objektbewegungen die Messung von mechanischen Größen wie Kräfte oder Momente. • Bewegungsprimitive stellen intuitive Abschnitte von geführten Bewegungen von Arbeitsmitteln oder Arbeitsobjekten ohne wirkende Zwangsbedingungen dar. Greifprimitive beschreiben den Form oder Kraftschluss beim Greifen oder Sichern von Objekten. • Sensomotorische Primitive sind sensorgestützte, geregelte Bewegungen von Arbeitsmitteln oder Arbeitsobjekten, die Zwangsbedingungen (Reaktionskräfte aufgrund von Bindungen oder räumlichen Einschränkungen) unterliegen.¹⁵ In der Robotik werden die Begriffe Primitive und Skills als Synonym verwendet.
Szenario	stellt in EFFIROB als Erweiterung zur Definition des Arbeitssystems den Rahmen zur Beschreibung und Gestaltung der für die Tätigkeitsausführung wesentlichen Interaktionen zwischen Dienstleister, Kunde, Einrichtungen, Umgebungen, Betriebs- und Arbeitsmittel dar.
Tätigkeitsanalyse	sind bedingungs- oder personenorientierte Untersuchungsmethoden (Beobachtung, Befragung, Fragebogen etc.) eines Arbeitssystems, mit denen Informationen über Arbeitsbedingungen, Arbeitsinhalte und Gesetzmäßigkeiten der Steuerung von Tätigkeiten gesammelt und bewertet werden. ¹²

>>

¹¹ Anforderungsermittlung (Arbeitsbewertung); Methodenlehre der Betriebsorganisation / REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. – München: Hanser, 2. Auflage 1991.

¹² Wächter, H.; Modrow-Thiel, B.; Schmitz, G.: Analyse von Tätigkeitsstrukturen und prospektive Arbeitsgestaltung bei Automatisierung (ATAA). Köln: Verlag TÜV Media, 1989.

¹³ Corsten, H.: Die Produktion von Dienstleistungen: Grundzüge einer Produktionswirtschaftslehre des tertiären Sektors. Berlin: Erich Schmidt 1985.

¹⁴ Milighetti, G.: Multisensorielle diskret-kontinuierliche Überwachung und Regelung humanoider Roboter. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Informatik, 2010.

¹⁵ Koeppel, R. H.: Robot Compliant Motion based on Human Skill. Dissertation Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 2001.



EFFIROB GLOSSAR

Roboterbezogene Begriffe

Arbeitsraum	Nach der VDI-Richtlinie 2861 wird für serielle Kinematiken in Haupt- und Nebenarbeitsraum unterschieden. Während der Hauptarbeitsraum die Positionierbarkeit des Tool Center Points (TCP) oder Werkzeugarbeitspunkts beschreibt, gibt der Nebenarbeitsraum die Orientierbarkeit des Endeffektors in einem Punkt des Hauptarbeitsraumes an. Ist bei seriellen Strukturen der Nebenarbeitsraum im Allgemeinen unabhängig von der Position des TCP im Hauptarbeitsraum, so lassen parallele Strukturen eine solche Entkoppelung in Haupt- und Nebenarbeitsraum nicht zu.
Autonomie und Autonomiegrad	Autonomie umschreibt die Fähigkeit eines Roboters, die Aufgabenausführung auf der Basis von Kontrollentscheidungen in Echtzeit zu regeln. Diese Kontrollentscheidungen basieren auf Wahrnehmungen, die sich wiederum aus aufgaben- und umweltspezifischen Eigenschaften zusammensetzen und über die Rückführung verschiedener Sensoren während der Aufgabenausführung entstehen. ¹⁷ Der Autonomiegrad ist ein qualitatives Maß für sicheres, zielorientiertes Systemverhalten von Robotern bezüglich ihrer Bewegungsführung in teilweise strukturierter, unstrukturierter oder dynamischer Umgebung mit selbsttätiger Adaption von Prozessparametern bzw. der Ablauffolge von Prozessschritten bei sich ändernden Randbedingungen.
Industrieroboter (IR)	sind nach ISO Standard 8373 automatische, programmierbare universell einsetzbare Manipulatoren, die in mehr als 3 Bewegungsachsen programmierbar sind und entweder ortsfest oder mobil für industrielle Automatisierungsaufgaben eingesetzt werden. Sie führen Greifer oder Werkzeuge (Endeffektoren).
Kinematischer Freiheitsgrad	Der Freiheitsgrad eines Objekts nach ISO 8373 im dreidimensionalen, euklidischen Raum beschreibt die Anzahl möglicher unabhängiger Bewegungen im Bezugskordinatensystem – definiert durch die minimale Anzahl von Translationen und Rotationen zur vollständigen Beschreibung der Stellung (Lage) des Objekts. Für im dreidimensionalen Raum frei bewegliche Objekte ist der Freiheitsgrad: $f = 6$ (3 Translationen und 3 Rotationen). Roboter besitzen im Allgemeinen 4 bis 6 Bewegungsfreiheitsgrade F . Ist $F > f$ spricht man von kinematisch redundanten Robotern, d.h. eine Punkt- und Orientierungsvorgabe ist im Allgemeinen durch unendlich viele Gelenkstellungen (Roboterkoordinaten) einnehmbar.
Manipulator, Handhabungsarm	Maschine oder Mechanismus, der aus einer Folge von rotatorischen und / oder translatorischen Gelenken besteht, mit dem Zweck, Objekte oder Werkzeuge in mehreren räumlichen Freiheitsgraden zu bewegen.
Manipulation	Bezeichnet den Prozess, Objekte geplant zu bewegen oder Objekte planvoll in Umgebungen zu positionieren. ¹⁸ Für eine Manipulations- oder Handhabungsaufgabe besteht zwischen Roboter und Objekt ein physischer Kontakt.
Navigation	Die Navigation von mobilen Robotern unterteilt sich drei Teilaufgaben: ¹⁹ <ul style="list-style-type: none"> • Selbstlokalisierung: Wo bin ich? Die Position innerhalb einer gegebenen Umgebung muss bestimmt werden. • Kartenerstellung bzw. Umgebungsmodellierung: Wohin gehe ich? Die Erstellung einer Karte der realen Umgebung, die zur Selbstlokalisierung oder Trajektorienplanung genutzt werden kann. • Trajektorienplanung: Wie gelange ich (optimal) dorthin? Bestimmen eines kollisionsfreien Weges von der Start- zur Zielposition.
Industrieroboter	ist nach ISO 8373 ein programmierbarer Manipulator mit mehr als 2 Bewegungsachsen, der sich in einer Umgebung bewegt oder ortsfest ist, um Fertigungsaufgaben automatisch auszuführen.
Serviceroboter (SR)	Ist gemäß der aktuellen Definition der IFR ein Roboter, der teil- oder vollautonom Dienstleistungen zum Nutzen menschlichen Wohlbefindens und für Einrichtungen ausführt. Serviceroboter werden unterschieden nach Serviceroboter für gewerbliche Anwendungen (üblicherweise bedient durch eine eingewiesene Person) und Serviceroboter für persönliche und domestische Anwendungen (bedient durch Laien, nicht eingewiesene Personen). ²⁰
Servicerobotik	Servicerobotik ist das Themengebiet und das Produktgebiet, das sich mit der Entwicklung, der Fertigung und der Anwendung von Servicerobotern systematisch befasst.

>>

¹⁷ Bajcsy, R.: From active perception to active cooperation - Fundamental processes of intelligent behavior. In: *Advances in Psychology, Visual Attention and Cognition*. Vol. 116, 1996, pp. 309-321.

¹⁸ Mason, M. T.: *Mechanics of Robotic Manipulation (Intelligent Robots and Autonomous Agents)*. MIT Press (August 2001)

¹⁹ Durrant-Whyte, H.: Where am I? A tutorial on mobile vehicle localization. In: *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 21(1994) Issue 2, pp.11-16.

²⁰ Norm-Entwurf: DIN EN ISO 8373: Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch (ISO/DIS 8373:2010); Deutsche Fassung prEN ISO 8373:2010



EFFIROB GLOSSAR

Serviceroboter-System (SRS)	In der jeweiligen Anwendung ist ein Serviceroboter zentraler Teil eines Arbeitssystems. Mit den zur Tätigkeitsausführung notwendigen Arbeits- bzw. Betriebsmitteln bildet er das Serviceroboter-System (SRS).
Wahrnehmung	eines Serviceroboters steht für die Fähigkeit, Informationen in Abhängigkeit der jeweiligen Umgebungssituation und aktuellen Aufgabe aufzunehmen und diese zur Aufgabenausführung zu nutzen. Spezifische, die Umgebung oder den Arbeitsprozess charakterisierende Merkmale oder Messgrößen werden durch Sensoren in elektrische Signale gewandelt. Durch ein Sensormodell erfolgt die Interpretation dieser Signale als Zustandsgrößen eines Umgebungs- bzw. Prozessmodells. Entsprechend der erforderlichen räumlichen Dimension zu erfassender Messgrößen werden Sensoren zur Objektlokalisierung, Objektidentifikation, 1-D bis 3-D-Umgebungserfassung sowie der Personenerkennung und -Lokalisierung eingesetzt.

Methodikbezogene Begriffe

Anwendungsfall (Use-Case)	Ein Anwendungsfall (Use Case) besteht aus mehreren zusammenhängenden Aufgaben, die von einem Akteur durchgeführt werden, um ein Ziel zu erreichen bzw. ein gewünschtes Ergebnis zu erstellen.* ⁹ Im vorliegenden Fall soll ein Use-Case Hauptfunktionen, die Akteure (Personen), Arbeitsobjekte und die Grenzen eines Systems in einem Diagramm intuitiv aufnehmen und darstellen.
Funktion	ist der abstrakt beschriebene Wirkzusammenhang zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems zum Erfüllen einer Aufgabe. ²¹
Funktionelle Analyse	Systematische Untersuchung, Ermittlung, Strukturierung und Optimierung aller zur Durchführung einer Aufgabe (eines Szenarios) notwendigen Funktionen mit den dazugehörigen Attributen (Anforderungen und Toleranzmaß) ihrer Erfüllung. ²²
iTASC-Formalismus	ist eine Methode zur Spezifikation von geometrischen oder mechanischen Zwangsbedingungen zwischen Relativbewegungen von Objekten. Hierzu werden die Zwangsbedingungen von Relativbewegungen zwischen zwei Objekten mit Hilfe von physischen oder abstrakten Objektmerkmalen (sog. Features wie Symmetrieachsen, Flächen, Mittelpunkte etc.) ausgedrückt in Objektkoordinaten.
Konzeption, konzeptionelle Gestaltung	Abschnitt der Gestaltung eines technischen Systems, der vom Klären der Aufgabenstellung bis zum Erarbeiten und Auswählen grobmaßstäblicher Prinziplösungen (Lösungskonzepte) reicht. ²³ Die Konzeption umfasst die Aufgabendefinitionsphase, die Phase der funktionellen Analyse sowie die Gestaltung. Die System-Gestaltung beinhaltet die systematische Bildung, Aggregation und Integration von Komponenten (Modulen).
Methode	ist eine aus einer geordnete Menge von Schritten bestehende, planmäßige Vorgehensweise zur Lösung eines konstruktiven Problems. Ein Verfahren ist dabei die Anwendung einer Methode unter Benutzung von Hilfsmitteln. ²³
Produktidee	Konkretisierter Vorschlag eines innovativen Serviceroboter-Einsatzes ohne detaillierte oder formale technische Ausarbeitung.
Sequenzdiagramm	Sequenzdiagramme beschreiben die Interaktion und Kommunikation zwischen Objekten oder Akteuren in einer bestimmten Szene. ²⁴ Es wird beschrieben, welche Objekte oder Akteure an der Szene beteiligt sind und in welcher Reihenfolge Interaktionen oder Informationsaustausch stattfinden. Das Sequenzdiagramm (engl. sequence diagram) ist eine der 14 Diagrammarten in der Unified Modeling Language (UML). ²³

>>

21 VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag, Mai 1993.

22 Encyclopedia of Science & Technology Encyclopedia. McGraw-Hill: <http://www.accessscience.com/index>.

23 Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I.: Das UML-Benutzerhandbuch. Workingham: Addison-Wesley, 1999.

24 Jacobson, I. et al.: Object-Oriented Software Engineering. Workingham: Addison-Wesley, 1993.



EFFIROB GLOSSAR

Systems Engineering (Systemtechnik)	verkörpert Techniken und Methoden der Ingenieurwissenschaften und stellt damit Instrumente zur Lösung komplexer Probleme bereit. In diesem Zusammenhang bezeichnen Methoden planmäßige Vorgehensweisen zur Gestaltung eines technischen Systems und Techniken das rationale Vorgehen zur Erreichung eines Ergebnisses. Wesentliche Eigenschaften der Vorgehensmodelle der Methoden des Systems Engineering sind: ²⁴ <ul style="list-style-type: none"> • Phasengliederung (z.B. Analyse-, Konzept-, Ausarbeitungsphase) • Top-down: vom Groben zum Detail • Variantenbildung zum Finden optimierter Lösungen • Problemlösungszyklus zur Strukturierung des Entwicklungsprozesses
Szenengraph	ist eine meist als Baum dargestellte Datenstruktur, welche geometrische Elemente einer physischen Szene oder im vorliegenden Fall: eines Arbeitssystems modelliert. Objektkoordinatensysteme (Arbeitsobjekte, Betriebs- oder Arbeitsmittel, Umgebungen und auch Personen) werden als Knoten modelliert, die Kanten zeigen die Verbindungen und Abhängigkeiten der Objekte.

Betriebswirtschaftliche Begriffe

Prozesskosten/ Leistungskosten/ Servicekosten	Kosten pro Bezugseinheit (z.B. Liter Milch, Arbeitsstunde), siehe auch „Servicefall“.
Servicefall	bezieht sich auf die Leistung, die einem Kunden in Rechnung gestellt werden kann. Beispiele: Wartungsstunden, Reinigungsstunden, etc.
Economies of Scale	Economies of Scale (Skalenerträge) bezeichnet Kostenverminderungen bezogen auf Komponenten und Systeme, die der Hersteller im Laufe ihrer Produktion realisieren kann. Diese beruhen dabei im Wesentlichen auf Lern- / Erfahrungseffekten sowie rein kalkulatorischen Kostendegressionen als Folge der Aufteilung der Fixkosten auf eine größere Produktionsmenge. ²⁵
Wirtschaftlichkeit	Die Wirtschaftlichkeit ist eine Kennzahl, die das Verhältnis von Output- zu Inputgrößen misst. Beim Handeln nach dem Wirtschaftlichkeitsprinzip ist dann (bei Auswahlproblemen) die Alternative zu wählen, die die höchste Wirtschaftlichkeit aufweist. ²⁶ Als Output kann Ertrag, Leistung oder Nutzen stehen, als Input Aufwand oder Kosten.

²⁵ Wirtschaftslexikon24.net; <http://www.wirtschaftslexikon24.net/d/economies-of-scale/economies-of-scale.htm>

²⁶ Wirtschaftslexikon24.net; <http://www.wirtschaftslexikon24.net/d/wirtschaftlichkeit/wirtschaftlichkeit.htm>



AUSGEWÄHLTE, WICHTIGE ABKÜRZUNGEN

AD	Axiomatic Design	OPM	Object Process Methodology (nach Dov Dori)
ATAA	Analyse von Tätigkeitsstrukturen und prospektive Arbeitsgestaltung bei Automatisierung	OEE	Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment Efficiency)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	pdf	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (engl. Probability Density Function)
CAD	Computergestütztes Konstruieren (engl. Computer-Aided Design)	PIR	Passiver Infrarotsensor
CAM	Computergestützte Fertigung (engl. Computer-Aided Manufacturing)	PJ	Personenjahr
CCD	Kamerachip (engl. Charge-Coupled Device)	PM	Personenmonat
COTS	Komponenten „von der Stange“ (engl. Components off-the-shelf), die kommerziell erhältlich sind	PT	Personentag
CP	Roboter-Bahnbetrieb (engl. Continuous Path)	PTP	Punkt-zu-Punkt-Betrieb (engl. Point-to-Point)
DCF	Abgezinster Geldfluss (engl. Discounted Cash Flow)	RFID	Identifizierungssystem (engl. Radio-Frequency Identification)
DGPS	Differential Global Positioning System	ROI	Return on Investment
DOF	Freiheitsgrad(e) (engl. Degree(s) of Freedom)	ROS	Robot Operating System; www.ros.org
DP	Entwurfparameter (engl. Design Parameters)		Horizontaler Knickarm-Roboter (engl. Selective Compliance Robot Assembly Arm)
EoS	Skalenerträge (engl. Economies of Scale)	SCARA	Horizontaler Knickarmroboter (engl. Selective Compliance Assembly Robot Arm)
F	verallgemeinerte Kraft (Kraft f , Momente t) in (Vektorschreibweise $(f_x, f_y, f_z, t_x, t_y, t_z)^T$)	SE	Systems Engineering
f	Feature; ein geometrischer Ort, Merkmal oder Point of Interest. Einem Feature werden lokale Feature-Koordinaten zugeordnet.	SLAM	Simultane Lokalisierung und Kartierung (engl. Simultaneous Localization and Mapping)
FM	Facility Management	SR	Serviceroboter
FP	Function Point(s)	SRS	Serviceroboter-System
FPS	Bilder pro Sekunde (engl. frames per second)	SW	Software
FR	Funktionelle Anforderung (engl. Functional Requirement)	T_i^j	4×4 Matrix, die translatorische, rotatorische und perspektivische Transformationen ausdrückt. i ist das Bezugskordinatensystem der Transformation, j ist das Auswahlkoordinatensystem. Es wird die Lage des Koordinatensystems K_j in Bezug auf K_i beschrieben.
FTS	Fahrerloses Transportsystem	TOF	Laufzeitverfahren (engl. Time of Flight)
GPS	Satellitenbasiertes Lokalisierungssystem (engl. Global Positioning System)	TRL	Technologie-Reifegrad (engl. Technology Readiness Level)
HH(L)	Handhabungs(-last)	USB	Serielle Datenverbindung für PCs (engl. Universal Serial Bus)
HW	Hardware	VDI	Verein deutscher Ingenieure
K	Steifigkeitsmatrix des Hookeschen Gesetzes $\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{x}$	VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
KMS	Kraft-Momenten-Sensor	VSLAM	Visual SLAM
LCC	Lebenszykluskosten (engl. Life Cycle Costs); Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing)	WLAN	Wireless Local Area Network
MIT	Massachusetts Institute of Technology (USA)	x	Ortsvektor inkl. der Raumwinkel $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T$
MSA	Marktstrukturanalyse		
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion		



GESPRÄCHSLEITFADEN

Im Folgenden werden die Gesprächsleitfäden als Basis für die Interviews wieder gegeben:

Gesprächsleitfaden Infogespräch

Datum:

Interviewer:

Interviewee:

Adresse:

Gesprächsziel: Bezug von Informationen zu unten stehenden Themen, Identifikation einer konkreten Anwendung, die für den Einsatz autonomer, mobiler Roboter in Frage kommt.

Zentrale Themen:

Angaben zu Volumen- und Wachstumswahlen des Zielmarktes

Relevante Kostentreiber

Main Players des Zielmarktes + Empfehlungen Ansprechpartner (Ausrüster/Hersteller, Anwender)

Besonderheiten und Einschränkungen des Zielmarktes

Ungelöste Probleme bisheriger Vorgehensweisen

Für Robotik in Betracht kommende Produktgruppen/Prozesse

Weitere Informationen

Gesprächsleitfaden Anwendergespräch

Datum:

Interviewer:

Interviewee:

Adresse:

Gesprächsziel: Vertiefung der Kenntnisse über betriebswirtschaftl. Situation des Anwenders; Identifikation zentraler Probleme technischer Art; Status quo des Robotereinsatzes

1. Betriebswirtschaftliche Situation

a) Fragen zum Anwendungsbereich allgemein:

Beschreibung des Marktes (Größe, Wachstum, Anzahl Wettbewerber, etc.)

Besonderheiten und Einschränkungen des Anwendungsbereichs (z. B. rechtliche Bestimmungen, ungewöhnliche Kundenstruktur)

b) Fragen zur (internen) betriebswirtschaftlichen Situation des Anwenders:

Kostenstruktur des Unternehmens allgemein (z. B. Verhältnis direkte zu indirekten Herstellungskosten, Lohnstruktur)

Investitionsverhalten und Finanzierungsrahmen des Unternehmens

Nutzungsverhalten/LCC-Größen (Jahresproduktionsmenge, Lohnkosten, Nachbesserungsrate, Ausschussrate, Verkaufspreis/produzierte Einheit, weitere)

2. Probleme und Wünsche technischer Art

Zentrale Anforderungen im Anwendungsbereich

Probleme im Anwendungsbereich und deren derzeitige Lösung

Verbesserungswünsche/-potenziale

Probleme und Wünsche der Ausrüster/Hersteller aus Anwendersicht

3. Status quo Servicerobotik im Anwendungsbereich

Ist-Situation Robotereinsatz (eigene und Branche)

Informationszugang des Anwenders zu Lösungen und Innovationen

4. Weitere Informationen



GESPRÄCHSLEITFADEN

Gesprächsleitfaden Herstellergespräch

Datum:

Interviewer:

Interviewee:

Adresse:

Gesprächsziel: Betriebswirtschaftl. und technische Einschätzung einer Robotiklösung seitens des Herstellers; Identifikation zentraler Probleme; Status quo des Robotereinsatzes

1. Technische Einschätzung des erarbeiteten Serviceroboter-Konzepts

Zentrale technische Anforderungen im Anwendungsbereich

Technische Probleme im Anwendungsbereich und deren derzeitige Lösung

Einschätzung zu technologischen Reifegraden

Bisherige Erfahrungen des Unternehmens mit Robotik

2. Betriebswirtschaftliche Einschätzung

a) Fragen zum Anwendungsbereich

Beschreibung des Marktes
(Größe, Wachstum, Anzahl Wettbewerber, etc.)

Mögliche alternative Einsatzszenarien

Relevante Preiskorridore, Mengengerüste und Lernkurve(n)
(hier insbesondere interessant: prozentuale Pauschalzuschläge bei der Vollkostenrechnung, z. B. Verwaltungsaufschlag, Gewinnaufschlag etc.)

Netzwerkstrukturen

Besonderheiten und Einschränkungen des Anwendungsbereichs mit Auswirkung auf marktwirtschaftliche Tätigkeiten
(z. B. rechtliche Bestimmungen, ungewöhnliche Kundenstruktur)

b) Fragen zur (internen) betriebswirtschaftlichen Situation des Herstellers

Kostenstruktur des Unternehmens allgemein (z. B. Verhältnis direkte zu indirekten Herstellungskosten, Lohnstruktur)

Nutzungsverhalten/LCC-Kenngrößen (Jahresproduktionsmenge, Lohnkosten, Nachbesserungsrate, Ausschussrate, Verkaufspreis/produzierte Einheit, weitere)

3. Weitere Informationen

ÜBER DIE AUTOREN



Dr.-Ing. Matthias Bengel hat Technische Informatik an der Universität Mannheim studiert. Seit 2001 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer IPA, Abteilung Robotersysteme, mit Schwerpunkt Steuerungsentwicklung für Robotersysteme und rekonfigurierbare Maschinen. Er promovierte 2010 über die Rekonfiguration von Fertigungssystemen.

Szenarien



Dipl.-Inf. Jan Fischer hat Informatik an der Universität Karlsruhe (TH) studiert. Seit 2008 arbeitet er am Fraunhofer IPA, Abteilung Robotersysteme, und koordiniert mehrere Projekte in seinem Forschungsgebiet Bildverarbeitung mit Schwerpunkt Erkennung von Objektposen mittels 3-D Bildverarbeitungsverfahren. Jan Fischer ist „Associate Member“ der „Intelligent Information Systems Group“ an der Winston-Salem State University, North Carolina, USA und Mitglied des „IEEE Technical Committee on Robot Learning“.

Szenario



Dipl.-Kfm. Dipl.-Inf. Nikolaus Blümlein hat Betriebswirtschaftslehre und Technische Informatik an der Universität Mannheim studiert. Seit 2008 arbeitet er am Fraunhofer IPA, Abteilung Robotersysteme, mit den Schwerpunkten Wirtschaftlichkeitsanalysen und Software-Entwicklung für Steuerungssysteme.

Methoden
Software,
stellvertretende
Projektleitung



Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Birgit Graf leitet am Fraunhofer IPA die Gruppe Haushalts- und Assistenzrobotik. Nach ihrem Diplom in Informatik an der Universität Stuttgart im Jahr 1999 konnte sie 2008 ihre Doktorarbeit über die Navigation eines intelligenten Gehhilferoboters erfolgreich abschließen. Sie war an der Entwicklung unterschiedlicher Generationen des Haushaltsroboters Care-O-bot beteiligt und hat eine Vielzahl weiterer Serviceroboter-Entwicklungen für unterschiedliche Kunden und Einsatzfelder geleitet. Im Jahr 2000 wurde sie gemeinsam mit ihren Kollegen mit dem Fraunhofer-Preis für die erfolgreiche Entwicklung dreier Museumsroboter ausgezeichnet.

Szenarien



Dipl.-Ing. Christian Connette hat Elektrotechnik und Informationstechnik an der Universität Karlsruhe studiert. Seit 2006 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPA, Abteilung Robotersysteme. Schwerpunkt seiner Arbeiten ist die Entwicklung von Verfahren zur Navigation und Regelung mobiler autonomer Systeme.

Szenarien



ÜBER DIE AUTOREN



Projektleitung
Methoden
Ergebnisse
FuE-Bedarfe
Dokumentation

Dipl.-Ing. Martin Hägele legte sein Maschinenbaustudium sowohl an der Universität Stuttgart (Dipl.-Ing.) als auch an der George-Washington-University in Washington D.C., USA, als Master of Science, im Jahr 1989 ab. Im selben Jahr startete er als Mitarbeiter am Fraunhofer IPA, 1993 wurde er Leiter der Abteilung Robotersysteme und 2001 Mitglied im Führungskreis des Fraunhofer IPA. Martin Hägele erhielt zahlreiche Auszeichnungen, unter anderem den Joseph-Engelberger-Award (2007).



Kapitel
Sicherheit

Dipl.-Ing. Theo Jacobs hat Maschinenbau an der Universität Hannover studiert. Er ist seit 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPA, wo er sich mit der Soft- und Hardware-Entwicklung des Care-O-bot^{®3} und dessen Nachfolger beschäftigt. Er ist darüber hinaus Mitglied eines ISO-Normungsausschusses zur Erarbeitung von Sicherheitsstandards für Serviceroboter.



Szenarien



Dipl.-Ing. Michael Höpf hat Technische Kybernetik an der Universität Stuttgart studiert. Seit 1981 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer IPA. Schwerpunkte seiner Arbeit sind Steuerungstechnik, neue Anwendungen von Industrie- und Servicerobotern sowie Technologieentwicklung in Branchen der Investitionsgüterindustrie.



LCC
Marktstruktur-,
Potenzialanalysen
Wirtschaftlichkeit

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Oliver Kleine studierte Wirtschaftsingenieurwesen, Fachrichtung Elektrotechnik, an der Technischen Universität Darmstadt. Von Oktober 2005 bis Juni 2007 arbeitete er als Unternehmensberater bei Emc². Seit Juni 2007 ist er Projektleiter im Competence Center Industrie- und Serviceinnovationen am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen momentan in den Bereichen des strategischen Produktions- und Innovationsmanagements.



01

02

03

04

05

06

07

ÜBER DIE AUTOREN



Szenarien



Dipl.-Ing. Kai Pfeiffer schloss sein Studium der Regelungstechnik an der Technischen Universität Darmstadt im Jahr 2002 ab. Direkt nach der Universität begann er die Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Robotersysteme am Fraunhofer IPA. Seit 2007 leitet er die Gruppe „Servicerobotik für industrielle und gewerbliche Anwendungen“.



Szenarien



Dipl.-Ing. Kay Wöltje studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. Seit 1994 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer IPA, Abteilung Robotersysteme, mit Schwerpunkt Industrieroboter in der Intralogistik, Steuerungsentwicklung für Roboter und simulationsbasierte Entwicklung von Automatisierungslösungen.



Szenarien



Dipl.-Ing. Arne Rost hat Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt studiert. Seit 2007 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPA. Er befasst sich mit der Entwicklung von seilzugbasierten Antriebssystemen, unter anderem für modulare Leichtbau-Gelenkarmroboter. Im Rahmen des Fraunhofer Verbundprojekts „Systemforschung Elektromobilität“ ist er an der Entwicklung von werkstatorientierten Batteriewechselsystemen beteiligt.

Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung

EFFIROB



Außenanlagenwartung



Bereitstellen von Pflegeutensilien



Bewegen von Personen in der stationären Altenpflege



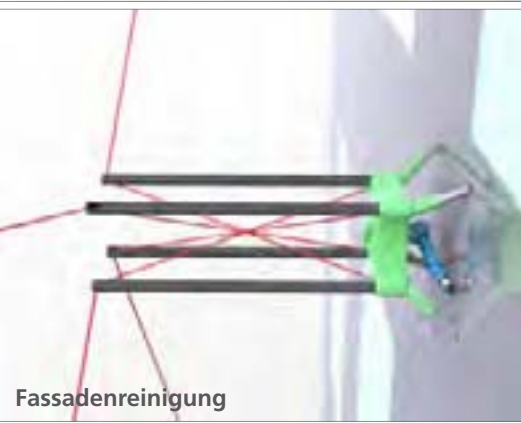
Bodenfrüchteernte



Bodenreinigung



Containertransport im Krankenhaus



Fassadenreinigung



Innenausbauassistentz



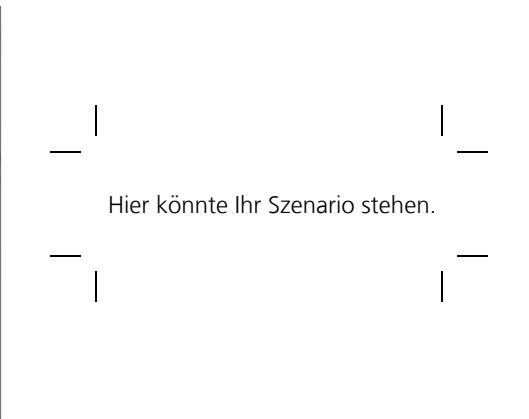
Kanalinspektion



Milchviehhaltung



Produktionsassistentz



Hier könnte Ihr Szenario stehen.