

MASSENMARKT SERVICEROBOTIK

HERAUSFORDERUNGEN UND POTENZIALE FÜR HERSTELLER UND ZULIEFERER IN DEUTSCHLAND

Kurzstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PAiCE – Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering

Impressum



Herausgeber

Begleitforschung PAiCE
iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI / VDE Innovation + Technik GmbH
Peter Gabriel
Steinplatz 1
10623 Berlin
gabriel@iit-berlin.de

Autoren

Dr. Matthias Bürger
Dr. Jens Schulz
Peter Gabriel

Gestaltung

LoeschHundLiepold
Kommunikation GmbH
Hauptstraße 28
10827 Berlin
paice@lhk.de

Stand

Dezember 2020

Bilder

Begleitforschung PAiCE

MASSENMARKT SERVICEROBOTIK

HERAUSFORDERUNGEN UND POTENZIALE FÜR HERSTELLER UND ZULIEFERER IN DEUTSCHLAND

Kurzstudie im Auftrag des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen
der Begleitforschung zum Technologieprogramm
PAiCE – Platforms | Additive Manufacturing |
Imaging | Communication | Engineering

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Executive Summary

Die vorliegende Studie liefert erstmals eine Schätzung der Umsatz- und Wertschöpfungspotenziale für Roboterhersteller und Komponentenzulieferer im zukünftigen B2C-Markt der Servicerobotik. Grundlage hierfür bilden Schätzungen von Expertinnen und Experten zu den relevanten Komponenten entsprechender Serviceroboter und deren Preisen im Rahmen einer nicht-repräsentativen Befragung. Die Analyse hat einen ausgeprägten explorativen Charakter. Die Ergebnisse sind dementsprechend als erste vorsichtige Näherung zu interpretieren.

Ausgangspunkt der Studie ist die Annahme, dass es im Massenmarkt tendenziell drei Arten von Servicerobotern geben wird:

- mobile Einheiten, insbesondere zum Transport von Gegenständen,
- stationäre Roboterarme zur Manipulation von Objekten sowie
- mobile Roboterarme als eine Kombination von beiden.

Für den sicheren Einsatz in Privat- und Arbeitsumgebungen müssen diese Serviceroboter die Vorgaben der ISO/TS 15066 (Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter) erfüllen. Im Massenmarkt sollten Roboter zudem über eine I/O-Einheit verfügen, die eine möglichst intuitive Ein- und Ausgabe von Daten ermöglicht, so dass die Bedienung ohne Schulung oder zusätzliche Sicherheitseinrichtungen gewährleistet wird. Die Benutzerschnittstelle kann dabei fast vollständig an Peripheriegeräten, wie z. B. Tablets oder Smartphones, ausgelagert werden. Mobile Roboter müssen in der Lage sein, sich innerhalb abgegrenzter Bereiche semi-/autonom bewegen zu können, wobei eine Genauigkeit im cm-Bereich als ausreichend anzusehen ist. Bei der Manipulation von Objekten dagegen ist eine Positioniergenauigkeit von ca. 5 mm und eine Greifer-Spannweite von 150 mm erstrebenswert, um Objekte des täglichen Lebens, die auch ein Mensch mit einer Hand bewegen kann, sicher greifen zu können. Das Systemgewicht dieser Roboter sollte aufgrund logistischer Überlegungen 25 kg nicht überschreiten.

Ausgehend von Schätzungen der Komponentenpreise ergeben sich Verkaufspreise für die finalen Endprodukte im Massenmarkt von knapp 1.600 EUR für eine mobile Einheit und rund 3.800 EUR für einen Roboterarm bzw. ca. 4.600 EUR für die Kombination aus beidem. In einem mittleren Szenario mit geschätzten 10 Mio.¹ weltweit verkauften Einheiten (herstellerübergreifend), gleichmäßig verteilt auf die drei Roboter-Kategorien, eröffnet sich damit ein Marktvolumen von 33,4 Mrd. EUR. Entsprechend ergibt sich bei 1 Mio.² bzw. 100 Mio.³ verkauften Exemplaren ein Marktvolumen von knapp 3,4 Mrd. EUR bzw. 334 Mrd. EUR.

¹ Diese Absatzmenge korrespondiert in etwa mit der von Fernsehgeräten in Deutschland im Jahr 2011 (gfu, 2020).

² Eine Million Exemplare wurden bspw. vom ersten iPhone zur Markteinführung im Jahr 2007 abgesetzt (Business Wire, 2019).

³ Diese Menge entspricht dem weltweiten Absatz von intelligenten Lautsprechern im Jahr 2018 (IDC, 2019).

Als mögliche deutsche Herstellerunternehmen kommen insbesondere Produzenten von Elektrowerkzeugen und weißer Ware in Betracht, die eine entsprechende Serienfertigung beherrschen, den Konsumentenmarkt kennen und über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügen. Gerade für die Herstellerunternehmen von Elektrowerkzeugen bieten sich dabei Synergieeffekte durch die Verwendung gleicher Bauteile sowie die Möglichkeit zur Integration vorgelagerter Wertschöpfungsstufen. Bei anderen Akteursgruppen wie z. B. Automobilherstellern, die bereits in Japan als Robotik-Anbieter in Erscheinung treten, Industrierobotik-Anbietern und Start-ups sind die individuellen Hürden aus unterschiedlichen Gründen deutlich höher.

Auf Ebene der Komponentenhersteller sind besonders die Segmente für E-Motoren, Sensorik, Greiftechnik und für den Spritzguss von Kunststoffteilen wie Rädern, Getrieben und Roboterarmgliedern relevant. In einem mittleren Markt mit einer Stückzahl von 10 Mio. verkauften Einheiten ergibt sich dabei ein Marktvolumen von rund 4,27 Mrd. EUR für das Segment der E-Motoren, 1,55 Mrd. EUR für die Anbieter von Sensoren, 1,33 Mrd. im Bereich der Greiftechnik sowie 933 Mio. für den Kunststoff-Spritzguss. Damit wird auch deutlich, dass die Potenziale auf Komponenten-Ebene im Vergleich zu den Potenzialen für die Roboterhersteller eher gering ausfallen. Selbst wenn es bspw. den deutschen Sensorherstellern gelingt, ihren derzeitigen Marktanteil in Höhe von 20 % im Massenmarkt zu behaupten, entspräche das im mittleren Szenario bei 10 Mio. verkauften Robotern einem Umsatz von lediglich 310 Mio. EUR, verglichen mit einem derzeitigen Umsatz von einigen zehn Milliarden EUR (AMA, 2018).

Um als Komponentenhersteller am Massenmarkt teilzuhaben, müssen sich deutsche Unternehmen aus der Elektroindustrie, die bisher E-Motoren, Sensoren und Greifer für die Industrie herstellen, auf eine Massenfertigung einlassen. Insbesondere Automobilzulieferunternehmen kennen den dort vorherrschenden Preisdruck bereits und verfügen über die entsprechende Erfahrung in der Großserienproduktion. Als Zulieferer für europäische Roboterhersteller können sich darüber hinaus Chancen für deutsche Spritzguss-Unternehmen bieten.

Die Software zum Betrieb der Roboterapplikationen ist ein zentraler Bestandteil zukünftiger Massenprodukte, der mit erheblichen Entwicklungskosten verbunden ist. Die Betriebssysteme stammen oft von US-Herstellern, oder es werden Open Source-Betriebssysteme verwendet. Die grundlegende Anwendungs-Software wird von den Herstellern in der Regel selbst erstellt, bzw. werden auch Entwicklungsaufträge an, meist verbundene Systemhäuser vergeben. Wengleich hier in der Regel hohe Anfangsinvestitionen und zu einem geringeren Teil auch Wartungskosten auftreten, skalieren diese Kosten mit steigender Stückzahl. Die Teilmärkte für die Betriebssysteme und Anwendungs-Software der Serviceroboter fallen damit bei der Marktpotenzialbetrachtung für den Massenmarkt kaum ins Gewicht.

Anders sieht das allerdings aus, wenn die Roboterhersteller ihre Systeme für Anwendungen von Dritten öffnen, wie dies bei Smartphones sehr erfolgreich praktiziert wird. Dann öffnet sich ein weiterer Markt, dessen Potenzial heute quantitativ aber noch nicht fundiert abgeschätzt werden kann. Bei Smartphones liegt das Umsatzvolumen der App-Store-Konsumausgaben bei rund 30 % des Hardware-Umsatzes. Es lässt sich daher durchaus annehmen, dass auch im Bereich der Servicerobotik im Endverbrauchermarkt ein profitables Ökosystem entstehen kann. Grundlegende Voraussetzung für dieses Ökosystem von Software-Apps wäre jedoch eine gewisse Standardisierung der Geräte. Basis dafür wäre entweder eine sehr kleine Anzahl dominierender Hersteller oder eine Einigung der Hersteller auf eine standardisierte semantische Integration von Software und Hardware, mit deren Hilfe eine App auf mehreren Robotern verwendet werden kann. Einige der im Technologieprogramm PAiCE des BMWi geförderten Plattform-Projekte, wie z. B. SeRoNet, arbeiten bereits an möglichen Lösungen für ein solches Ökosystem der Servicerobotik. Wie bei den Smartphones ist es absehbar, dass die Endhersteller von Servicerobotern mit der Etablierung von App Stores ihre Kundenbindung weiter festigen werden. Das ist ein weiteres Argument dafür, dass sich deutsche Unternehmen auch in dieser Rolle am Markt engagieren sollten.

Massenmarkt Servicerobotik

Mindestanforderungen an einen massenmarktauglichen Serviceroboter

Tragfähigkeit	1,5 kg
Greifweite	150 mm
Positioniergenauigkeit Greifer	5 mm
Gesamtgewicht	< 25 kg

Preis (je nach Konfiguration)

mobile Einheit	1.583 EUR
stationärer Roboterarm	3.829 EUR
mobiler Roboterarm	4.601 EUR

Marktvolumen (bei 10 Mio. Stück/Jahr)

Endprodukt Serviceroboter	30,40 Mrd. EUR
Zulieferung E-Motoren	4,27 Mrd. EUR
Zulieferung Sensoren	1,55 Mrd. EUR
Zulieferung Greifer	1,33 Mrd. EUR
Zulieferung Spritzguss	0,93 Mrd. EUR

Inhalt

1 Einleitung	8
2 Methodisches Vorgehen	10
3 Funktionale Anforderungen an Serviceroboter im Massenmarkt	15
4 Schätzung der Herstellereinstellpreise	17
4.1 Mobile Einheit	17
4.2 Roboterarm	19
4.3 Sensoren	20
4.4 Energieversorgung	22
4.5 Rechereinheit	23
4.6 I/O-Einheit	24
4.7 Software	24
4.8 Gesamtkosten und Endpreise	25
5 Wertschöpfungspotenziale für deutsche Roboter- und Komponentenhersteller	29
5.1 Marktpotenziale für Komponenten und Endprodukte	29
5.2 Chancen deutscher Unternehmen für die Marktteilnahme	31
5.2.1 Endprodukt Serviceroboter	31
5.2.2 Elektromotoren	33
5.2.3 Sensortechnik	34
5.2.4 Greiftechnik	34
5.2.5 Kunststoffspritzguss	34
5.2.6 Batterien	35
5.2.7 Prozessoren, Fest- und Arbeitsspeicher	35
5.2.8 Software	36
6 Das Potenzial für ein Ökosystem der Servicerobotik	37
7 Fazit und Ausblick	40
Literatur	41

1 Einleitung

Eine traditionelle Stärke der deutschen Wirtschaft ist die Automatisierungstechnik und damit insbesondere auch die Industrierobotik. Während der Markt für Industrieroboter im Jahr 2018 ein Rekordvolumen von 16,5 Mrd. USD erreichte, ist mittlerweile auch die Servicerobotik in professionellen und privaten Anwendungsbereichen auf dem Vormarsch. Der Umsatz mit professionellen Servicerobotern erreichte 2018 ein Volumen von 9,2 Mrd. USD. Als Anwendungsgebiete sind dabei insbesondere die Logistik, die Landwirtschaft und die Medizin zu nennen (IFR, 2019). In der Pflege ist der alltägliche und flächendeckende Einsatz von Servicerobotern mittlerweile ebenfalls denkbar (SeRoDi, 2019). Auch im privaten Bereich hat die Nutzung von Servicerobotern stark zugenommen, wobei sich die Anwendungen hierbei noch auf einige wenige Produktgruppen beschränken, wie z. B. Bodenreinigungs-, Rasenmä- und Multimedia-Roboter (insbesondere aus dem sogenannten Edutainment-Bereich). Zukünftig rechnet man hier aber mit einem starken Wachstum und anspruchsvolleren Servicerobotern, die nicht nur der Unterhaltung dienen, sondern auch bei der Hausarbeit assistieren oder ältere Menschen im täglichen Leben unterstützen (IFR, 2019). Während jedoch in der professionellen Robotik (B2B) im Jahr 2018 rund 47 % der weltweit verkauften Serviceroboter aus Europa kamen (46 % aus Amerika, 7 % aus Asien), stammten im Consumer-Markt mit Haushaltsrobotern (B2C) im selben Zeitraum lediglich 4 % der abgesetzten Einheiten von europäischen Unternehmen (73 % aus Amerika, 22 % aus Asien). Somit stellt sich die Frage, ob deutsche Unternehmen am erwarteten Wachstum der Servicerobotik im B2C-Bereich partizipieren werden und wenn ja, welche Unternehmen dazugehören können. Diese Studie geht erstmals dieser Frage nach und nähert sich dieser auf Angebotsseite in drei Schritten:

1. Schätzen der Kosten für Hardware- und Software-Komponenten und der daraus abgeleiteten Preise für Serviceroboter im Massenmarkt
2. Ableiten der Wertschöpfungspotenziale für Roboter- und Komponentenhersteller
3. Diskussion der Marktchancen für Unternehmen aus Deutschland

Dabei wird die Frage nach der oder den Anwendungen, die der Servicerobotik letztlich zum Marktdurchbruch verhelfen werden, bewusst ausgeklammert. Das tun wir, wohlwissend, dass für den Erfolg der Servicerobotik im Massenmarkt ein angemessener Preis zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung ist. Ausschlaggebend für den Erfolg wird sein, ob der Roboter ein spezifisches Bedürfnis der Kundinnen und Kunden adäquat befriedigen kann. Hierfür sind ein genau spezifizierter Anwendungszweck und eine wohldefinierte Zielgruppe Grundvoraussetzungen. Genau daran scheitern jedoch bisher die meisten Serviceroboter am Markt. Welche konkreten Robotik-Anwendungen sich zukünftig am Markt durchsetzen werden, lässt sich a priori jedoch nicht seriös abschätzen und ist folglich auch nicht Ziel der Studie. Gleichsam am Rande diskutieren wir im Kasten „Erfolgsfaktoren für die Markteinführung von Servicerobotern“ auf S. 10 trotzdem, was erfolgreiche Produkte in diesem Segment auszeichnet – und was nicht.

Unsere eigentliche Analyse basiert auf der generellen Grundannahme, dass es einen Bedarf an privaten Servicerobotern gibt. Grundvoraussetzung dafür ist, dass sie mindestens zwei der folgenden drei Funktionen beherrschen:

- Kommunikation mit Nutzerinnen und Nutzern
- (Teil-)autonome Navigation in geschlossenen Räumen
- Greifen und Bewegen von Gegenständen des Alltags

Darauf aufbauend wird die Angebotsseite des Marktes explorativ betrachtet. Dabei werden für den Massenmarkt die Preise von Komponenten und Endprodukten geschätzt sowie anschließend die Chancen deutscher Komponenten- und Roboterhersteller im Massenmarkt diskutiert. Grundlage sind die Meinungen von Expertinnen und Experten, die wir in einer explorativen, nicht-repräsentativen Befragung erhoben haben. Die Studie folgt dabei der Annahme, dass der Massenmarkt für Serviceroboter durch deutlich geringere Herstellungskosten aufgrund angepasster und standardisierter Produkteigenschaften sowie einer ausgeprägten Stückkostendegression gekennzeichnet sein wird. Es wird dabei sowohl die Hardware der Serviceroboter als auch ihre Software berücksichtigt. Zudem wird die Möglichkeit eines sich entwickelnden Ökosystems für Software-Anwendungen diskutiert, wie sie von den App Stores der beiden großen Smartphone-Ökosysteme bekannt sind und dort maßgeblich zum Erfolg dieser Geräteklasse beigetragen haben. Hier können jedoch die befragten Expertinnen und Experten sowie die Autoren derzeit nur erste Vermutungen äußern, wohingegen quantitative Abschätzungen aktuell nicht möglich sind.

Die Studie gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 erläutert im Folgenden zunächst das methodische Vorgehen. Kapitel 3 stellt die technischen Anforderungen an einen idealtypischen Serviceroboter im Massenmarkt vor. Anschließend werden in Kapitel 4 die Herstellungskosten und die Endpreise zukünftiger Serviceroboter abgeschätzt, wenn sie in großer Zahl hergestellt werden. Kapitel 5 leitet daraus eine Abschätzung der Wertschöpfungspotenziale und Chancen für Unternehmen aus Deutschland in diesem Markt ab. Dem folgt in Kapitel 6 eine Betrachtung, wie ein Ökosystem für Serviceroboter entstehen und aussehen könnte.

2 Methodisches Vorgehen

Ziel der Studie ist es erstens, aufzuzeigen ob Serviceroboter zukünftig zu einem massenmarktfähigen Preis angeboten werden können und zweitens, welche Wertschöpfungspotenziale sich dabei für Unternehmen aus Deutschland ergeben. Dabei sollen insbesondere folgende Leitfragen beantwortet werden:

- Welche Einkaufspreise bzw. Herstellungskosten sind für die Hardware- und Software-Komponenten und welche Endpreise sind für die Endprodukte im Massenmarkt absehbar?
- Welche Wertschöpfungspotenziale bestehen sowohl für Roboter- als auch für Komponentenhersteller im zukünftigen Massenmarkt?
- Welche Chancen ergeben sich im Massenmarkt für Roboter- und Komponentenhersteller aus Deutschland?

Für die Beantwortung dieser Fragen ist zunächst die Festlegung einer Arbeitsdefinition für Serviceroboter⁴ erforderlich. Allgemein wird mit einem Serviceroboter die Fähigkeit zur teil-/autonomen Ausführung von Bewegungsabläufen in mehreren Achsen verbunden. Dabei muss ein Serviceroboter programmierbar und ggf. sensorgeführt sein. Während die Definition der International Federation of Robotics (in Anlehnung an die ISO 8373) Produktionstätigkeiten noch explizit ausschließt (IFR, 2012), orientiert sich die Studie an der etwas weiteren Definition der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK (iit, 2013a):

“Demnach wird heute unter einem Serviceroboter ein meist mobiler Roboter verstanden, der Dienstleistungen entweder in direkter Kollaboration mit dem Nutzer [bzw. der Nutzerin] oder völlig autonom erbringt. Der Serviceroboter unterscheidet sich somit grundlegend von einem Industrieroboter, da er zur Durchführung seiner Aufgaben besondere Fähigkeiten benötigt (z. B. Umfelderkennung und Interpretation, Lernfähigkeit, einfache Instruktion), die ein Industrieroboter nicht hat. Serviceroboter zeichnen sich generell durch größere Flexibilität und höhere Autonomie aus.“

Analog zu Industrierobotern können auch Serviceroboter entweder stationär, d. h. an einem Ort fixiert eingesetzt werden oder mobil agieren. Ganz allgemein lässt sich zwischen Servicerobotern für den privaten und für den professionellen Bereich unterscheiden. Gerade im privaten Bereich agieren Roboter in gering- oder unstrukturierten Umgebungen. Im Unterschied zu vielen professionellen Robotern müssen sie über eine leicht und sicher zu handhabende Bedienoberfläche verfügen, so dass für ihre Bedienung kein speziell geschultes Personal benötigt wird. Zudem muss ihr Verhalten für den Menschen jederzeit ungefährlich sein. Die Studie fokussiert insbesondere Serviceroboter für den privaten Bereich (B2C). Jedoch ist davon auszugehen, dass auch im Massenmarkt für professionelle Serviceroboter ähnliche Anforderungen bezüglich einer einfachen Bedienbarkeit ohne zusätzliche Schulung des Personals oder besondere Sicherheitsvorkehrungen bestehen werden.

Die Beantwortung der oben genannten Leitfragen erfolgt in den folgenden vier Schritten:

1. Bestimmung der Anforderungen an Serviceroboter im Massenmarkt: Als Grundlage für die nachfolgenden Schritte wurden zunächst die Grundanforderungen an Serviceroboter im Massenmarkt formuliert. Diese repräsentieren die grundsätzlichen Annah-

⁴ Eine universelle Definition für Roboter existiert in der Literatur bisher nicht. Bestehende Definitionen unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander.

men, auf denen die weiteren Schätzungen beruhen. Dazu zählen insbesondere die Spezifikationen hinsichtlich der Grundfunktionalitäten der Roboter – Kommunikation, Manipulation und Navigation.

2. Erfassung von Komponenten und deren Preisen: Im nächsten Schritt wurden die relevanten Komponenten von Servicerobotern sowie deren Bezugskosten ermittelt. Betrachtet wurden dabei ausschließlich die relevanten Kostentreiber. Dazu zählen in erster Linie diejenigen Hardware-Komponenten, deren spezifische Ausprägungen sich sowohl auf die Funktionalität des Roboters als auch auf dessen Preis auswirken sowie die Software der Roboter.
3. Ermittlung der Wertschöpfungspotenziale: Aufbauend auf den ermittelten Preisen der Komponenten wurden die jeweiligen Wertschöpfungspotenziale sowohl für einzelne Komponentengruppen als auch für die finalen Endprodukte geschätzt. Hierfür wurden die Komponenten- und Roboterpreise in drei verschiedenen Szenarien über die darin jeweils zugrunde gelegten Absatzzahlen aufsummiert.
4. Diskussion der Chancen für deutsche Hersteller: Abschließend wurde eine qualitative Betrachtung der jeweiligen Wirtschaftszweige vorgenommen, die für die Herstellung der Serviceroboter bzw. einzelner Komponenten in Betracht kommen. Dabei wird diskutiert, welchen dieser Wirtschaftszweige realistische Chancen im Massenmarkt eingeräumt werden können.

Schritt 1 erfolgte im Rahmen des Desk Research. Schritt 2 wurde gemeinsam mit insgesamt 15 Expertinnen und Experten aus Industrie und Forschung erarbeitet. Dazu zählen Forscherinnen und Forscher aus den Bereichen Haushalts- und Assistenzrobotik, Mechatronik und Künstliche Intelligenz (insbesondere Sprachtechnologie), Sensortechnik und Batterietechnik sowie Vertreterinnen und Vertreter von Roboterherstellern. Schritt 3 beruht auf eigenen Berechnungen, in die die Ergebnisse aus Schritt 2 eingegangen sind. Schritt 4 basiert wiederum auf den Einschätzungen der Expertinnen und Experten und eigenen Betrachtungen.

Erste telefonische Interviews dienten zunächst dazu die Erkenntnisse aus Schritt 1 zu validieren, eine Liste der relevanten Komponenten zu erstellen und mögliche alternative Bauweisen von Servicerobotern sowie die Marktchancen deutscher Anbieter der jeweiligen Komponenten zu erörtern. Darüber hinaus wurde anhand der Ergebnisse aus den Telefoninterviews ein Fragebogen erstellt, der im Anschluss dazu genutzt wurde, die Expertinnen und Experten zu den Hardware-Komponenten und deren Preisen zu befragen. Ziel war es dabei, die wichtigsten technischen Komponenten eines Serviceroboters im Massenmarkt (insbesondere für den B2C-Bereich) abzubilden und deren Kosten zu schätzen. Zur Harmonisierung der Antworten wurden erneut Telefoninterviews mit denjenigen Befragten durchgeführt, die für eine oder mehrere der Komponenten Antworten gegeben hatten, die sich deutlich von den übrigen abhoben.

Auf Anregung der Expertinnen und Experten wird abschließend ein mögliches zukünftiges Software-Ökosystem diskutiert. Während Herstellungskosten und Endpreise der Serviceroboter und damit das Wertschöpfungspotenzial für deutsche Hersteller zu einem gewissen Grad fundiert abgeschätzt werden, ist das für den zukünftigen Markt von Apps, die durch Dritte erstellt werden können, noch nicht möglich. Das liegt vor allem daran, dass die Marktstruktur noch unklar ist: Wird der App Store für die Servicerobotik durch ein dominierendes Unternehmen oder durch eine gemeinsame Initiative mehrerer Hersteller getrieben? Die Abschätzung des Marktpotenzials bleibt damit weitgehend qualitativ.

Der Dank der Autoren gilt den Expertinnen und Experten, die an den Interviews und/oder der Befragung teilgenommen haben:

- Dr. Marco Evertz – VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
- Dr.-Ing. Birgit Graf – Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
- Theo Jacobs – Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
- Peter Kraus – AKTORmed GmbH
- Dr. Matthias Künzel – VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
- Michael Lorenz – RWTH Aachen
- Prof. Dr. Christian Schlegel – Technische Hochschule Ulm

Acht weitere beteiligte Expertinnen und Experten haben auf eine namentliche Nennung verzichtet, um die Vertraulichkeit bei ihren Kostenschätzungen zu wahren.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beruhen auf den Einschätzungen der beteiligten Expertinnen und Experten. Für mögliche Fehler sind ausschließlich die Autoren verantwortlich.

Erfolgsfaktoren für die Markteinführung von Servicerobotern

Die Liste der Gründe warum Produkte und Unternehmen scheitern ist lang. Häufig ist es nicht ein einzelner Umstand der ein Produkt zum Scheitern verurteilt, sondern das Aufeinandertreffen vieler verschiedener Gründe. Die Unternehmensberatung Fresh Consulting (2020) zählt insbesondere

- die Fokussierung auf das falsche Problem
- einen schlechter Product/Market Fit
- eine schlechte User Experience

zu den häufigsten Ursachen für das Scheitern von Robotik-Unternehmen.

Mehr noch als in anderen Branchen ist für Robotik-Unternehmen eine klare Fokussierung auf die Kernkompetenzen und der richtige Product/Market Fit erfolgsentscheidend. Zunächst einmal ist es aus Kundensicht besser ein Problem gut als viele Probleme mittelmäßig oder sogar schlecht zu lösen. Auch macht es ein starker Fokus der Zielgruppe einfacher, Nutzen und Zweck des Roboters zu verstehen. Ein Roboter, der eine oder zwei klar definierte Aufgaben außergewöhnlich gut ausführen kann, transportiert eine klare Vision. Zudem werden dadurch wichtige Ressourcen geschont und die Time-to-Market möglichst kurzgehalten. Der Versuch, so viele Funktionen wie möglich zu integrieren – auch als Over-Engineering bezeichnet – vergeudet dagegen Kapital und Ressourcen. Anstatt also zu versuchen, einen Roboter zu entwickeln und zu vermarkten, der viele unterschiedliche Dinge bewerkstelligen kann, ist es daher besonders wichtig, sich auf die Lösung eines spezifischen Problems zu konzentrieren (Fresh Consulting, 2020).

Doch nicht der Fokus allein ist entscheidend, sondern auch, dass dieser auf die Lösung des richtigen Problems gerichtet ist. Muss man Kunden erst aufwendig informieren oder gar aufklären, welches Problem der Roboter löst und warum dies wichtig ist, wurde sicherlich bereits der falsche Schwerpunkt gesetzt. Es ist daher von entscheidender Bedeutung das Problem klar zu umreißen, eine schnelle und kosteneffiziente Automatisie-

runungslösung zu entwickeln und sicherzugehen, dass die Zielgruppe groß genug, an der Automatisierungslösung tatsächlich interessiert und auch bereit ist, dafür das notwendige Geld auszugeben. Denn zum richtigen Product/Market Fit gehört auch die passende Preisgestaltung. Darin liegt für viele Roboter-Hersteller jedoch eine der größten Herausforderungen. Auch wenn der Roboter genau die Automatisierungslösung liefert, nach der der Markt verlangt, wird sich kein Erfolg einstellen, wenn der Preis die Zahlungsbereitschaft der Zielgruppe übersteigt. Daran kann auch die beste Technologie nichts ändern. Einen Ausweg (insbesondere im B2B-Bereich) können dabei unter Umständen „Robot-as-a-Service“-Geschäftsmodelle (RaaS) bieten. Jedoch sind diese in Bezug auf ihre Erfolgsaussichten branchenabhängig und längst nicht für alle Anbieter geeignet (Fresh Consulting, 2020).

Die dritte Hürde, an der Robotik-Unternehmen häufig scheitern, ist die User Experience – das Nutzungserlebnis oder auch UX. Gerade im Massenmarkt ist eine einfache und intuitive Bedienbarkeit zwingend erforderlich. Häufig sind Einrichtung und Betrieb von Robotern jedoch noch immer viel zu kompliziert, als dass sie von der breiten Masse adaptiert werden würden. Auch die Zuverlässigkeit der Roboter spielt dabei eine wichtige Rolle. Kann man sich auf den Roboter nicht verlassen und muss diesen ständig überwachen, erfüllt er das Nutzenversprechen schlichtweg nicht und lässt die Anwendenden frustriert zurück. Je weniger menschliche Eingriffe dagegen notwendig sind, desto eher wird eine Automatisierungslösung als solche akzeptiert (Fresh Consulting, 2020).

Daraus ergeben sich im Umkehrschluss folgende drei Erfolgsfaktoren:

1. Klares Nutzenversprechen
2. Angemessener Preis
3. Einfache Bedienbarkeit

Eindrucksvoll beobachten lassen sich diese Erfolgsfaktoren am Beispiel von Staubsaugrobotern, wie z. B. Roomba von iRobot, einem der Pioniere in diesem Markt. iRobot wurde 1990 von Ingenieur:innen des MIT gegründet und hat seitdem weltweit mehr als 30 Mio. Haushaltsroboter verkauft. 2002 wurde der Bodensaugroboter Roomba vorgestellt. Die Funktionalität des Geräts beschränkt sich auf das wesentliche – das Saugen von Böden. Darüber hinaus bietet der Hersteller auch einen Roboter an, der auf das Wischen von Böden spezialisiert ist. Es wurde aber klar vermieden einen Roboter zu entwickeln der beides kann, dadurch aber wahrscheinlich sehr viel komplexer und teurer wäre. Das Problem, welches diese Roboter lösen ist damit einfach und für alle verständlich. Darüber hinaus ist das Staubsaugen eine Tätigkeit, die viele Menschen gerne abgeben, so dass eine Automatisierungslösung generell akzeptiert wird. Der Einstiegspreis liegt mit rund 250 € in einem für viele akzeptablen Bereich. Im Vergleich zu einer menschlichen Reinigungskraft amortisiert sich die Anschaffung damit schon meist nach wenigen Monaten. Auf menschliches Eingreifen kann beim Benutzen dieser Roboter weitestgehend verzichtet werden. Lediglich zum Entleeren des Staubbehälters muss Hand angelegt werden. Nutzenversprechen, Preis und Bedienbarkeit sind damit bei Roomba und vielen weiteren Staubsaugrobotern gegeben, was sich im Markterfolg der Modelle widerspiegelt. 2018 wurden weltweit bereits mehr als 11 Mio. dieser Roboter verkauft (IFR 2019). Ein ähnliches Potenzial lässt sich für die Rasenmäh-Roboter erwarten, wenn diese ihre bisherigen Defizite überwinden. Dazu zählt u. a. dass sie bisher nicht auf jedem Untergrund zurechtkommen sowie eine durch die Batterie begrenzte Reichweite (IFR 2019).

Daneben lassen sich aber auch Servicerobotik-Projekte nennen, die an den oben genannten Punkten gescheitert sind. Wie schädlich sich bspw. der fehlende Fokus eines Robotik-Unternehmens auswirken kann veranschaulicht das Beispiel Jiibo, eines sozialen Roboters für zu Hause. Jiibo sollte zu einer Art Robotik-Plattform entwickelt werden, um möglichst viele Funktionalitäten abzudecken. Der Roboter konnte sich dabei nicht fortbewegen, sondern lediglich den Kopf drehen und neigen. Jiibo konnte Gesichter erkennen, Fragen verstehen und darauf antworten, Fotos und Videos aufnehmen, an Termine erinnern, im Internet recherchieren und mehr. Auch wenn Jiibo damit in der Lage war, viele Aufgaben zu erledigen, waren diese letztlich für die Zielgruppe nicht relevant genug. Zudem war dem Roboter mit der Vielzahl an intelligenten Lautsprechern starke Konkurrenz erwachsen (Fresh Consulting, 2020). All dies führte dazu, dass das 2012 gegründete Unternehmen Investments in Höhe von rund 73 Mio. USD aufbrauchte und letztlich aus dem Geschäft ausscheiden musste (The RobotReport, 2018).

Auch das Beispiel Aria Insights verdeutlicht, wie ein falscher Fokus einem Servicerobotik-Unternehmen zum Verhängnis werden kann. Aria Insights wurde von einer Mitgründerin von iRobot ins Leben gerufen. Das Unternehmen fertigte Drohnen, die insbesondere in der Landwirtschaft, bei der Strafverfolgung und für militärische Zwecke eingesetzt wurden. In 2019 vollzog die Firma schließlich einen Strategiewechsel hin zur Sammlung und Speicherung von Daten durch die Drohnen. Die Daten sollten der Kundschaft tiefere Einblicke in ihre eigenen Prozesse gewähren. Da den meisten Unternehmen jedoch die Ressourcen fehlten, um die von den Drohnen gesammelten Daten zu verwerten, scheiterte das Projekt. Darüber hinaus war der Preis von 5.000 USD für den Massenmarkt schlicht zu hoch (Fresh Consulting, 2020).

Wie sich ein zu hoher Preis auswirkt, lässt sich am Beispiel Keecker erkennen. Keecker war ein kleiner Roboter für zu Hause, der sich selbstständig fortbewegen und insbesondere Videoinhalte auf Wände und Decken projizieren konnte. Der Roboter schien einen Nerv bei seiner Klientel zu treffen, denn die verkauften Exemplare liefen durchschnittlich rund 3,5 Stunden pro Tag in den Haushalten ihrer Nutzerinnen und Nutzer. Insgesamt konnten jedoch am Ende nur etwas mehr als eintausend Einheiten abgesetzt werden. Dies lag u. a. am Preispunkt. Letztlich war Keecker mit knapp 2.000 USD schlicht zu teuer für den Massenmarkt (Fresh Consulting, 2020). Beispiele für zu hohe Preise aus dem Spielwarenbereich sind u. a. der für 450 EUR angebotene Dinosaurier-Roboter Pleo und der Roboterhund Aibo mit einem Preis von mehr als 2.000 EUR.

Wie positiv sich dagegen eine einfache Bedienbarkeit auswirken kann, beweist das Beispiel Intuitive Surgical, eines US-amerikanischen Robotik-Unternehmens aus der Medizintechnik. Die Firma entwickelte ein Bedieninterface, das so intuitiv war, dass Nutzerinnen und Nutzer damit spielerisch experimentieren konnten und dadurch erst die Einsatzmöglichkeiten des Roboters aufzeigten. Die Firma entwickelte ihren Roboter nicht explizit für die chirurgische Behandlung von Prostatakrebs, vielmehr entdeckte ihre Kundschaft dieses Anwendungsfeld.

3 Funktionale Anforderungen an Serviceroboter im Massenmarkt

Den Ausgangspunkt der Studie bildet die Annahme, dass Serviceroboter in einem zukünftigen Massenmarkt eine Kombination aus mindestens zwei der folgenden drei Funktionen beherrschen müssen:

- Kommunikation
- Navigation
- Manipulation

Ohne eine intelligente Kommunikationseinheit ist die oben erwähnte Anforderung einer einfachen Bedienbarkeit nicht gegeben, da für die Befehlseingabe im Massenmarkt die Nutzung einer Programmiersprache nicht in Betracht kommt. Ohne eine der beiden anderen Funktionen dagegen ist die grundlegende Anforderung an einen Roboter zur Ausführung von Bewegungsabläufen nicht erfüllt.

Kommunikation: Der Roboter muss somit zwingend über eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle (User Interface) verfügen, welche eine einfache und intuitive Ein- und Ausgabe von Daten ermöglicht (I/O-Einheit). Diese kann vollständig integriert oder teilweise an Peripheriegeräte, wie z. B. Tablets oder Smartphones, ausgelagert werden. Die Kommunikation mit dem Roboter kann dabei bspw. über eine Sprachsteuerung erfolgen, welche mindestens Schlüsselwörter erkennen sowie mit Handlungsaufforderungen verknüpfen kann und die ggf. durch grafische bzw. haptische Elemente ergänzt wird.

Zusätzlich müssen Serviceroboter mindestens eine der beiden anderen Funktionen – Navigation und/oder Manipulation – erfüllen.

Navigation: Die mobile Einheit des Serviceroboters sollte die Fähigkeit besitzen, sich innerhalb abgegrenzter Privat- oder Arbeitsbereiche semi-/autonom bewegen zu können. Der öffentliche Raum und damit die Thematik des autonomen Fahrens sollen dabei explizit ausgeschlossen sein. Innerhalb von Gebäuden sollte der Roboter in der Lage sein, Türschwellen und Teppichkanten, jedoch nicht notwendigerweise Treppen, ohne Hilfe zu bewältigen, da sich die Herstellungskosten andernfalls deutlich erhöhen würden. Die maximale Traglast soll bei ca. 15 kg liegen. Damit ist gewährleistet, dass typische Gegenstände, wie z. B. eine volle Getränkekiste, transportiert werden können oder ein Greifarm inklusive des zu manipulierenden Objekts (siehe nächster Absatz) getragen werden kann. Die Positioniergenauigkeit beim Navigieren spielt eher eine untergeordnete Rolle, muss aber hinreichend hoch sein, um einerseits nicht mit Hindernissen zu kollidieren und andererseits einen evtl. vorhandenen Roboterarm in Reichweite des zu manipulierenden Objekts zu positionieren. Hierfür ist eine Genauigkeit im cm-Bereich als ausreichend anzusehen.

Manipulation: Der Roboterarm sollte in der Lage sein, insbesondere Objekte des täglichen Lebens zu bewegen, die aufgrund ihrer Größe, Gewicht und Geometrie auch von Menschen mit einer Hand greifbar sowie relativ fest und druckunempfindlich sind. Das maximale Gewicht der zu greifenden Gegenstände sollte ca. 1,5 kg betragen, so dass bspw. eine volle 0,7 l Mehrwegwasserflasche gegriffen werden kann. Die Spannweite des Greifers sollte dafür rund 150 mm betragen. Die minimale Höhe der zu greifenden Objekte wird auf 5 mm begrenzt, so dass z. B. auch ein flachliegendes Smartphone gegriffen werden kann. Bezüg-

lich der Manipulation von Objekten wird eine Positioniergenauigkeit von ca. 5 mm, bei einer Winkelauflösung von ca. 5 Grad für Anwendungen im Massenmarkt als ausreichend angesehen.

Anhand der hier beschriebenen Funktionen ergeben sich prinzipiell drei Arten von Servicerobotern⁵:

1. eine mobile (Transport-)Einheit
2. ein stationärer Roboterarm
3. ein mobiler Roboterarm (als Kombination der beiden zuvor genannten Arten)

Das Systemgewicht dieser Robotik-Lösungen sollte 25 kg nicht überschreiten. Andernfalls wird der Transport vom Ort des Kaufs nach Hause deutlich erschwert, da sich dieses Gewicht kaum über längere Distanzen tragen lässt und auch Logistikdienstleister dies zumeist als maximales Paketgewicht akzeptieren. Zudem erschwert ein höheres Gewicht den Umgang mit dem Roboter im Haushalt, z. B. wenn dieser im ausgeschalteten Zustand zur Seite geräumt werden muss. Für die sichere Mensch-Maschine-Kollaboration müssen entsprechende Robotik-Anwendungen die Vorgaben der ISO/TS 15066 (Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter) erfüllen.

4 Schätzung der Herstellungskosten und Endpreise

Grundlage für die Betrachtung des Wertschöpfungspotenzials der Produktion von Servicerobotern für die deutsche Industrie sind die Herstellungskosten, die wir in diesem Kapitel aus der Perspektive der Herstellerunternehmen von Servicerobotern untersuchen. Dabei unterscheiden wir zwischen den Materialkosten für die Hardware und den Entwicklungskosten für die Software. Die Materialkosten eines Serviceroboters müssen selbstverständlich je produziertes Stück betrachtet werden. Die Software wird dagegen nur einmal entwickelt, und die Entwicklungskosten werden dann über einen bestimmten Zeitraum auf die gefertigten Stückzahlen umgelegt.

Bei der Darstellung der Materialkosten für die Hardware wird zunächst zwischen den Komponenten der mobilen Einheit und denen des Roboterarms unterschieden. Die Komponenten der Sensorik, der Energieversorgung, der Rechereinheit sowie der I/O-Einheit werden im Anschluss separat betrachtet, da diese sowohl für die mobile Einheit als auch für den Roboterarm benötigt werden. Die angegebenen Preise der Komponenten beruhen auf Schätzungen der Expertinnen und Experten und sind als Bezugspreise der Roboterhersteller zu interpretieren. Um die Kostendegression der Komponenten zu berücksichtigen, wurden auch zukünftige Preise im Massenmarkt geschätzt.

Bei der Schätzung des Anteils der Softwarekosten an den Stückkosten der Serviceroboter wurde, wie auch bei anderen Elektronikgeräten üblich, zwischen Betriebssystem und Anwendungs-Software unterschieden. Neben der Schätzung von Lizenzierungs- bzw. Erstellungskosten sind hier insbesondere die zu treffenden Annahmen zu Absatzzahlen und Länge des Produktzyklus entscheidend, die für die Verteilung der Kosten auf die Stückzahlen maßgeblich sind. Für die Zwecke der Studie wurden dabei pragmatische Ansätze gewählt. Im Bereich der Unterhaltungselektronik oder der weißen Ware werden häufig bereits alle zwei bis drei Jahre neue Produktvarianten eingeführt, so dass auch für die Serviceroboter ein Produktlebenszyklus von drei Jahren zugrunde gelegt wurde. Der Beginn des Massenmarkts wird ab einem jährlichen Absatz von 1 Mio. Stück definiert, was in etwa dem Absatz des ersten iPhones zur Markteinführung im Jahr 2007 entspricht (Business Wire, 2019).

Die Gesamtpreise der Roboter, in die u. a. auch noch Montage, Marketing, Vertrieb etc. einfließen, beruhen auf eigenen Berechnungen denen die Komponentenpreise zugrunde liegen. Die Gesamtpreise sind als Endpreise für Verbraucherinnen und Verbraucher zu verstehen.

4.1 Mobile Einheit

Für den Antrieb einer mobilen Einheit kommen derzeit in Servicerobotern verschiedenste Systeme zum Einsatz. Diese reichen von einfachen Dreirädern mit einem angetriebenen, lenkbaren Rad und zwei passiven Rädern über Kettenantriebe bis hin zu bipedalen (zweifüßigen) oder quadrupedalen (vierfüßigen) Antrieben. Häufig werden jedoch omnidirektionale Antriebe mit Mecanum- bzw. Allseitenrädern verwendet. Diese ermöglichen es Robotern, jederzeit in eine beliebige Richtung fahren zu können. Hierfür ist es jedoch notwendig, dass drei oder vier Räder unabhängig voneinander angetrieben werden. Die kosteneffizienteste und damit im Massenmarkt wahrscheinlichste Antriebsform, die auch heute bereits vielfach in mobilen Einheiten Verwendung findet, stellt dagegen der Differentialantrieb dar. Dabei werden zwei Räder getrennt voneinander durch jeweils einen Motor angetrieben. Für eine stabile Lage sorgen zusätzlich ein oder zwei passive Stützräder bzw. -rollen. Neben der Tatsache, dass lediglich zwei Motoren benötigt werden, entfällt gleichzeitig auch die

⁵ Prinzipiell sind natürlich auch andere Bauformen möglich, wie z. B. humanoide Roboter oder individuell konfigurierbare Module. Unter der Prämisse der kostengünstigsten Bauweise werden diese in der Studie jedoch nicht berücksichtigt.

Notwendigkeit einer aufwendigeren Lenkinematik. Auf Basis dieser Annahme lautet die Liste der benötigten Komponenten wie folgt:

Mobile Einheit Komponenten	heute		Massenmarkt	
	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)
Fahrgestell/Rahmen	1	50–1.000	1	50
Räder	3–4	20–30	3–4	10
Elektromotoren	2	150–300	2	20
Getriebe	2	200–250	–	–

Tabelle 1: Die Kosten der Komponenten für die mobile Einheit

Für das Fahrgestell kommen prinzipiell sehr unterschiedliche Bauweisen und Materialien in Frage. Insbesondere im professionellen Bereich werden dabei derzeit vor allem Blechbiegeteile verwendet. Ein solcher Rahmen einer mobilen Einheit kann dabei mehrere Hundert bis über Tausend EUR kosten. Allerdings kann bereits heute mithilfe eines kostenoptimierten Designs der Preis des Fahrgestells auf ca. 50 EUR reduziert werden. Gerade im Hinblick auf die Relevanz der Stückkosten und des Gewichts im zukünftigen Massenmarkt ist jedoch davon auszugehen, dass sich der Kunststoffspritzguss durchsetzen wird. Bei gleicher Stabilität erhöht sich das Volumen der Einzelteile aus Kunststoff gegenüber Stahl zwar ca. um das Doppelte. Dafür bietet Kunststoff jedoch einen deutlichen Gewichtsvorteil. Ein geeigneter Kunststoff mit hoher Reißlänge sowie hoher thermischer und chemischer Beständigkeit ist bspw. Ultem. Während das Gewicht von 1 dm³ Stahl ca. 8 kg beträgt, entspricht das Gewicht von 2 dm³ Ultem lediglich 2,68 kg. Neben Ultem, welches bei großen Abnahmemengen etwa 15 EUR je kg kostet, kommen auch deutlich günstigere Kunststoffe für unter 5 EUR je kg in Betracht. Insgesamt sind für Lösungen aus Metall sowie aus Kunststoff Preise unter 50 EUR im Massenmarkt als realistisch anzusehen.

Für Differenzialantriebe mobiler Einheiten werden bisher insbesondere Räder mit Metallfelgen und Gummibereifung sowie ein bis zwei passive Lenkrollen genutzt. Die hierfür anfallenden Kosten liegen bei etwa 20 bis 30 EUR pro Rad. Auch hier ist damit zu rechnen, dass aus Kunststoff gefertigte Räder die kostengünstigere Wahl im Massenmarkt sein werden. Denkbar ist beispielsweise im Mehrkomponenten-Spritzgussverfahren Felge und Reifen in einem Arbeitsgang zu fertigen. Bei entsprechend großen Stückzahlen sind dabei Preise deutlich unter 10 EUR realisierbar.

Einen der größten Kostenblöcke der mobilen Einheit – sowie des Serviceroboters insgesamt – stellen die Motoren dar. Für mobile Einheiten mit Differenzialantrieb werden dabei zumeist zwei (bürstenlose) Servomotoren mit integriertem Getriebe eingesetzt. Motoren, die in aktuellen Servicerobotern zum Einsatz kommen, liegen preislich etwa im Bereich zwischen 150 und 300 EUR je Stück. Neben den (Servo-)Motoren verfügen mobile Einheiten mit Differentialantrieb heute zumeist über zusätzliche Getriebe für eine stärkere Untersetzung der Motoren sowie zur Differentialsteuerung. Die Kosten dieser Getriebe liegen dabei im Bereich von 200 bis 250 EUR.

Unter der Prämisse, dass sich im Massenmarkt die kostengünstigste Bauweise durchsetzen wird, ist davon auszugehen, dass für die mobile Einheit ein Direktantrieb ohne zusätzliches Getriebe zur Differenzialsteuerung die wahrscheinlichste Option darstellt. Ob dabei ein Servomotor oder ein günstigerer Schrittmotor Verwendung findet, wird sich letztlich nach den individuellen Anforderungen des jeweiligen Roboters richten. Schrittmotoren haben dabei den Vorteil, dass sich mit ihnen niedrige Drehzahlen auch ohne zusätzliches Getriebe realisieren lassen. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Preise der Motoren im Massenmarkt aufgrund geringerer Anforderungen an Präzision und Leistung sowie aufgrund hoher Abnahmemengen unter 20 EUR liegen werden.

4.2 Roboterarm

Um den Einsatzbereich eines Roboterarms möglichst flexibel zu gestalten, werden prinzipiell sechs Achsen benötigt.⁶ Für die Glieder und tragenden Teile der Roboterarm-Kinematik gibt es ähnlich wie beim Fahrgestell der mobilen Einheit verschiedene, alternative Bauformen und Materialien. Dabei lassen sich zunächst direktaktuierte Kinematiken mit verteilten Antrieben und fernaktuierte Kinematiken unterscheiden, bei denen die Antriebe über Seilzüge die einzelnen Gelenke ansteuern. Letztere nehmen jedoch aufgrund bauartbedingter Nachteile eher eine untergeordnete Rolle ein. Auch im Massenmarkt wird daher von einer Bauweise mit verteilten Antrieben ausgegangen.

Roboterarm Komponenten	heute		Massenmarkt	
	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)
Roboterarm-Kinematik/Glieder	6	15–500	6	10
Elektromotoren	6	150–400	6	100
Getriebe	6	200–500	6	20
Greifer/ Lastaufnahmemittel	1	500–1.000	1	200

Tabelle 2: Die Kosten der Komponenten für den Roboterarm

Die einzelnen Glieder bzw. tragenden Bauteile aktueller Roboterarme werden dabei überwiegend aus Metall- (Legierungen) aber auch bereits aus Kunststoff (z. B. IGUS) oder auch aus Kohlefaser (z. B. Kinova) gefertigt. Für außenliegende Verkleidungen kommen in der Regel Kunststoffe zum Einsatz. Entsprechend der Anzahl der Achsen werden für einen Roboterarm mindestens sechs Komponenten für die einzelnen Glieder benötigt. Je nach Bauform und Material schwanken die Kosten dabei stark. Insbesondere bei bearbeitungsintensiven Lösungen aus Metall steigen die Kosten pro Glied schnell auf 100 bis 500 EUR. Analog zum Fahrgestell sind jedoch auch hier mit einem kostenoptimierten Design bereits deutlich günstigere Lösungen für ca. 15 EUR je Glied realisierbar. Im Massenmarkt ist zudem auch bei der Fertigung der mechanischen, tragenden Elemente des Roboterarms mit dem Einsatz von Kunststoffspritzguss zu rechnen, da dieser Gewichtsvorteile sowie bei hohen Stückzahlen deutliche Kostenvorteile verspricht.

⁶ Für Roboter, die sehr spezifische Tätigkeiten verrichten, können dagegen durchaus auch weniger Achsen ausreichend sein.

Analog zur Anzahl der Achsen werden für den Roboterarm sechs Motoren benötigt. Im Gegensatz zu den Motoren der mobilen Einheit kommt es bei diesen deutlich stärker auf deren Präzision, Baugröße und Nutzlast an. Der Motor an der untersten Achse muss dabei in der Lage sein, den gesamten Arm inklusive aller anderen Motoren sowie die Nutzlast zu halten. Etwaige Abweichungen der Motoren addieren sich dabei potenziell über sechs Achsen. Eine kleine Bauform ist zudem relevant, um die Motoren verteilt an den Achsen in den Roboterarm zu integrieren. Für diese Zwecke werden heutzutage vorwiegend (bürstenlose) Servomotoren eingesetzt, deren Preise sich im Bereich zwischen 150 und 400 EUR bewegen. Die Motoren benötigen zudem hochwertige Getriebe, die hohe Übersetzungsverhältnisse bei gleichzeitig kleiner Bauform gewährleisten. Dabei kommen vor allem Wellgetriebe – insbesondere Harmonic Drive – zur Anwendung, die aufgrund ihrer kleinen Baugröße besonders geeignet sind. Für entsprechend hochwertige Getriebe sind aktuell ca. 200 bis 500 EUR zu kalkulieren. Insgesamt führen damit allein die Motoren und Getriebe zu Kosten in Höhe von 350 EUR bis 900 EUR je Achse bzw. 2.100 bis 5.400 EUR für den gesamten Sechs-Achs-Roboterarm.

Für eine deutliche Reduktion der Materialkosten müssen daher im Massenmarkt voraussichtlich andere Komponenten gewählt werden als jene, die derzeit im professionellen Bereich zum Einsatz kommen. Bei den Motoren sind dabei Abstriche bezüglich Präzision und Nutzlast denkbar, so dass bei entsprechend hohen Stückzahlen Preise von unter 100 EUR realisiert werden könnten. Sollten für einfache Anwendungen auch Schrittmotoren infrage kommen, könnten sogar noch günstigere Preise erzielt werden. Zudem kann im Massenmarkt u. U. auf günstigere Planetengetriebe zurückgegriffen werden, die je nach Nutzlast und Präzisionsanforderungen auch im Spritzgussverfahren aus Kunststoff gefertigt sein können. Preise für Planetengetriebe von ca. 20 EUR sind damit als realistisch anzusehen. Da im Massenmarkt Motoren und Getriebe typischerweise als speziell konfigurierte Einheit bezogen werden, ist davon auszugehen, dass diese zusammen nicht mehr als 100 EUR kosten werden.

Bezüglich des Greifers gilt als wahrscheinlichste Option im Massenmarkt ein einfacher Zweibackengreifer. Für das sichere Greifen von Objekten muss dieser zudem mit geeigneter Sensorik, wie z. B. Kraft-Moment-Sensoren, ausgestattet sein. Entsprechende Lösungen sind aktuell für 500 bis 1.000 EUR erhältlich. Ist der Greifer zudem für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ausgelegt, liegen die Preise durchaus darüber. So ist auch im Massenmarkt bei der Abnahme großer Stückzahlen mit Kosten von ca. 200 EUR zu rechnen. Günstigere Greifer sind jedoch grundsätzlich vorstellbar, insofern beim Greifen auf Sensorik verzichtet werden kann und gleichzeitig die Kraft des Greifers auf für Menschen ungefährliche Werte begrenzt wird. Für Hand und Finger sind dies gemäß ISO/TS 15066 bis zu 140 N. Ohne diese Sensorik würden auch einfache Greifer-Konzepte (bspw. aus Kunststoffspritzguss) möglich sein, wodurch Preise auch deutlich unter 100 EUR realisierbar wären. Um auch ohne Sensorik ein sicheres Greifen zu gewährleisten, ist bspw. eine bionische Struktur denkbar.

4.3 Sensorik

Sowohl für die mobile Einheit als auch für den Roboterarm werden unterschiedliche Sensoren zur Umwelterkennung verwendet. Aktuell kommen dabei in der Servicerobotik insbesondere Sicherheits-Laserscanner (LiDAR) zum Einsatz, die für den MRK-Einsatz zugelassen sind. Typischerweise wird eine mobile Einheit mit zwei Laserscannern ausgestattet, wobei jeweils einer nach vorn und einer nach hinten ausgerichtet ist. Da diese Sensoren in

der Regel einen Winkelbereich von 270° abdecken, lässt sich mit dieser Konfiguration der gesamte Raum um die mobile Einheit erfassen. Die Stückkosten für Sicherheits-Laserscanner liegen derzeit meist bei mehr als 1.000 EUR.

Zusätzlich wird für den Roboterarm mindestens ein 3D-Sensor benötigt. Dazu zählen Sensoren nach dem Structured-Light-Prinzip genauso wie Time-of-Flight (ToF)- und Stereokameras. Je nach Anwendung kann ein Roboterarm auch mit bis zu vier dieser Sensoren ausgestattet sein, um den Arbeitsbereich zu allen vier Seiten erfassen zu können. Die Preise dieser Sensoren liegen je nach Funktionsweise zwischen 100 und 500 EUR, wobei Sensoren nach dem Structured-Light-Prinzip generell günstiger als ToF-Kameras sind. RGB-D Sensoren sind ab etwa 200 EUR erhältlich. Mit diesen ließen sich prinzipiell auch Laserscanner ersetzen. Dabei sind jedoch vier dieser Sensoren für die mobile Einheit notwendig, um die gesamte Umgebung abzudecken.

Aufgrund der hohen Stückkostendegression in der Sensorherstellung sind im Massenmarkt sowohl für Laserscanner als auch für 3D-Sensoren Preise um 50 EUR pro Stück realistisch. Dies setzt jedoch voraus, dass die maximale kinetische Energie des Roboters, aufgrund einer leichten Bauweise und geringer Motorleistungen, so gering ist, dass auf sicherheitszertifizierte Sensoren verzichtet werden kann.

Sensorik Komponenten	heute		Massenmarkt	
	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)
Laserscanner (LiDAR)	2	1.000	2	50
3D-Sensor	1–4	100–500	1	50
Radarsensor	0–1	200	–	–
Näherungssensor	0–3	400–500	–	–
Ultraschallsensor	0–1	300	–	–
Laserentfernungsmesser	0–1	50–100	–	–
Kraftmomentsensor	0–1	200–1.000	–	–
Gyrosensor	0–1	20–50	–	–
Stoßsensor, -leiste (Bumper)	1–6	50–100	1	5

Tabelle 3: Die Kosten der Sensorik

Je nach Unternehmen und Einsatzzweck kommen derzeit, neben den bereits genannten, zum Teil noch verschiedene weitere Sensoren zum Einsatz. Dazu gehören neben Radar-, Näherungs- und Ultraschallsensoren auch einfache Laser-Entfernungsmesser sowie Gyro- und Kraftmomentsensoren. Im Gegensatz zu Laserscannern und 3D-Sensoren sind

diese jedoch nicht zwingend für die Grundfunktionalität des Roboters notwendig, sondern können je nach Anforderungen und Anwendungsbereich hinzugefügt werden.

Sinnvoll erscheint dagegen auch in einem zukünftigen Massenmarkt die Verwendung einfacher Stoßsensoren bzw. -leisten, die als Notaus-Schalter dienen. Die Preise dieser Sensoren schwanken je nach Anforderungen stark und liegen heute im Bereich zwischen 50 und 100 EUR. Für den Massenmarkt sind hierbei jedoch Stückpreise im einstelligen Euro-Bereich als realistisch anzusehen.

4.4 Energieversorgung

Für die Energieversorgung von Servicerobotern werden aktuell verschiedene Lithium-Ionen Akkumulatoren verwendet, welche sich generell durch eine hohe Energiedichte auszeichnen. Da sich diese Batterietechnik bereits in anderen Anwendungsgebieten im Massenmarkt etabliert und bewährt hat (z. B. Mobiltelefone, Laptops, Elektromobilität, etc.), ist damit auch im zukünftigen Massenmarkt der Servicerobotik zu rechnen. Gängige Bauformen umfassen dabei Kathoden aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA), Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan (NMC), Lithium-Mangan-Oxid (LMO) oder Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) (Thielmann et al., 2020).

Hochenergetische Lithium-Ionen-Batterien leisten derzeit bis zu 250 Wh/kg. Für professionelle Serviceroboter spielt darüber hinaus häufig die Baugröße der Batterien eine Rolle, die sich durch deren spezifische volumetrische Energiedichte (gemessen in Wh/l) ergibt. Hochenergetische Batterien kosten dabei heutzutage bis zu 350 EUR je kWh. Dieser Wert wird in den kommenden zehn Jahren voraussichtlich auf deutlich unter 100 EUR je kWh sinken (Thielmann et al., 2020). Serviceroboter in privaten Anwendungen müssen zudem nicht zwingend über sehr lange Laufzeiten verfügen und können häufiger geladen werden. In einem Testbericht mit acht Staubsaugrobotern gibt die Stiftung Warentest (2019) für die Hälfte der Geräte bei vollem Akku eine Laufzeit von unter 60 min an, wobei die mittlere Dauer zum Laden des leeren Akkus bei knapp unter 3 Stunden liegt. Es ist also davon auszugehen, dass bei privaten Servicerobotern nicht die höchste volumetrische Energiedichte ausschlaggebend für die Wahl der Batterie sein wird. Dadurch können günstigere Batterien zum Einsatz kommen. Heute verwendete Batterien liegen preislich in etwa im Bereich zwischen 300 und 500 EUR je Batterie. Im zukünftigen Massenmarkt ist dagegen mit Preisen unter 100 EUR zu rechnen. Die Spezifikationen der verwendeten Batterien und damit deren genaue Preise richten sich letztlich nach den individuellen Anforderungen des jeweiligen Serviceroboters. Dabei kann insbesondere bei stationär eingesetzten Roboterarmen auf eine Batterie gänzlich verzichtet werden. Neben der Batterie ist zudem ein Ladegerät erforderlich bzw. im Fall eines stationären Roboterarms ein Netzteil.

Energieversorgung	heute		Massenmarkt	
	Komponenten	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)	Anzahl
Akku	1-2	300-500	1-2	100
Ladegerät/Netzteil	1	20-50	1	20

Tabelle 4: Die Kosten der Komponenten für die Energieversorgung

4.5 Rechnereinheit

In der Rechnereinheit aktueller Serviceroboter kommen häufig Haupt- und Grafikprozessoren (CPU und GPU) zum Einsatz, die in ihrer Leistung der eines durchschnittlichen Multimedia-PCs entsprechen. Grafikprozessoren werden insbesondere für Bildverarbeitungs- und KI-Anwendungen verwendet. Die Leistung dieser Prozessoren ist sowohl für die Berechnung der Kinematiken als auch für eine Sprachsteuerung ausreichend. Die Kosten für einen entsprechenden Prozessor liegen heute bei etwa 200 EUR. Teilweise werden auch komplette Industrie-PCs eingesetzt, die für etwa 900 EUR erhältlich sind. Darüber hinaus gibt es bereits Serviceroboter, die von Embedded Systems – Einplatinencomputern mit leistungsfähigen Mikrocontrollern – gesteuert werden. Diese sind deutlich günstiger als ein Industrie-PC und werden daher voraussichtlich auch im Massenmarkt Verwendung finden. Dabei ist mit Preisen in Höhe von nicht mehr als 20 EUR zu rechnen.

Zusätzlich verfügen heutige Serviceroboter über etwa 8 bis 16 Gigabyte Arbeitsspeicher, deren Kosten sich im Bereich zwischen 50 und 100 EUR bewegen. Als Festspeicher werden überwiegend Solid State Drives (SSD) mit einer Kapazität von etwa 500 Gigabyte verwendet, die ebenfalls für ca. 50 bis 100 EUR erhältlich sind. Für viele Anwendungen sind jedoch deutlich kleinere Speicherkapazitäten bereits ausreichend. Zudem ist auch in Zukunft mit weiterhin fallenden Preisen für Arbeits- und Festspeicher zu rechnen, so dass die benötigten Komponenten im Massenmarkt für jeweils nicht mehr als 10 EUR beziehbar sein sollten.

Daneben bietet sich zukünftig ggf. auch die Möglichkeit, die Rechenleistung in die Cloud oder an Peripheriegeräte auszulagern. Als Voraussetzung hierfür ist jedoch ein gut funktionierender Breitband-Internetanschluss anzusehen, um sowohl die Navigation als auch die Berechnung der Kinematiken des Roboterarms mit akzeptabler Latenz sicherstellen zu können. Darüber hinaus ließe sich ein Smartphone temporär in den Roboter integrieren, so dass dieser sowohl auf die Rechenleistung als auch auf die Sensoren des Smartphones zugreifen kann.

Rechnereinheit	heute		Massenmarkt	
	Komponenten	Anzahl	Preis je Einheit (in EUR)	Anzahl
CPU/GPU	1	200-900	1	20
Arbeitsspeicher	1	50-100	1	20
Festspeicher	1	50-100	1	10

Tabelle 5: Die Kosten der Komponenten für die Rechnereinheit

4.6 I/O-Einheit

Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert wurde, muss der Roboter über eine I/O-Einheit verfügen, welche die visuelle, auditive und ggf. haptische Ein- und Ausgabe von Daten zulässt. Die Funktionalität der I/O-Einheit lässt sich dabei prinzipiell fast vollständig an Peripheriegeräte wie Smartphones oder Tablets auslagern, so dass hierfür im Extremfall – abgesehen für ein WLAN- bzw. Bluetooth-Modul zur Verbindung mit Peripheriegeräten – kaum zusätzliche Kosten entstehen. Die entsprechenden Komponenten eines solchen Interface, wie Touchscreen, Lautsprecher, Mikrophon, etc. wurden im Rahmen dieser Studie daher nicht erhoben. Die Kosten des WLAN- oder Bluetooth-Moduls werden unter sonstige Kosten erfasst.

Sämtliche für die I/O-Einheit benötigten Komponenten sind darüber hinaus in diversen intelligenten Lautsprechern im Massenmarkt verfügbar. Produkte wie z. B. Amazon Echo Show oder Google Nest Hub werden im Handel teilweise bereits für deutlich unter 100 EUR angeboten. So ist davon auszugehen, dass deren Komponenten preislich im niedrigeren zweistelligen Euro-Bereich liegen. Damit zählen diese Komponenten auch bei einer integrierten I/O-Einheit nicht zu den entscheidenden Kostentreibern der Serviceroboter.

4.7 Software

Neben den Materialkosten sind zudem auch die Kosten der Softwareentwicklung abzuschätzen. Die Software ist eines der zentralen Elemente für die Funktionalität und Zuverlässigkeit eines Roboters. Dabei ist zunächst das Betriebssystem des Roboters zu betrachten, welches die Systemressourcen spezifischen Anwendungsprogrammen zur Verfügung stellt. Betriebssysteme für Embedded Systems basieren heute fast ausschließlich auf Unix-Basis. Damit ergeben sich für den Massenmarkt zwei wahrscheinliche Optionen. Zunächst einmal ist die Verwendung und ggfs. Anpassung eines unixoiden Open Source-Betriebssystem, typischerweise Embedded Linux, möglich. Tatsächlich ist das heute bei eingebetteten Systemen die häufigste Variante (Ambercore 2919). Alternativ ließe sich ein proprietäres, lizenzpflichtiges Unix-ähnliches System nutzen.

Auch bei Open Source-Betriebssystemen entstehen dem Herstellerunternehmen Kosten für etwaige Portierungen, weitere Systemanpassungen und Zertifizierungen. Würden die Aufwände dafür die Lizenzkosten eines proprietären Betriebssystems wesentlich überschreiten, ist ein Wechsel vom Open Source- zum kommerziellen Unix aus betriebswirtschaftlichen Gründen absehbar. Für die Kostenabschätzung gehen wir daher vom Einsatz eines proprietären Unix-Systems aus. Als Basis dient dabei das marktgängige Echtzeit-Unix QNX, das auch für den Betrieb von Infotainment-Systemen in Kraftfahrzeugen verwendet wird. Die Kosten für entsprechende Lizenzen belaufen sich auf ca. drei bis fünf USD pro Auto (Forbes 2017). Für die Zwecke dieser Studie werden daher mittlere Kosten in Höhe von vier EUR pro Roboter veranschlagt.

Neben dem Betriebssystem werden zudem spezifische Anwendungsprogramme benötigt. Auch wenn zukünftig externe Entwicklerinnen und Entwickler eigene Apps anbieten, ist es kaum vorstellbar, dass ein Roboter völlig ohne eigene grundlegende Anwendungssoftware erfolgreich in den Markt eingeführt werden könnte. Die Entwicklungskosten entsprechender Software sind dabei nur schwer abzuschätzen und hängen stark von der Komplexität der jeweiligen Anwendungen ab. In einer gemeinsamen Studie der Fraunhofer-Institute IPA (Stuttgart) und ISI (Karlsruhe) wurden u. a. die Kosten der Softwareentwicklung für

unterschiedliche Servicerobotik-Anwendungen ermittelt. Dabei wurde der ungefähre Aufwand mittels Function-Point-Metrik sowie anhand von Expertenschätzungen unter Berücksichtigung bestehender Softwarebibliotheken hergeleitet und mit Personenmonatskosten bewertet (Fraunhofer IPA, ISI, 2011). Von den in der Studie untersuchten Anwendungsszenarien ist für die vorliegende Untersuchung insbesondere der Bodenreinigungsroboter relevant, da dieser ebenfalls als mobile Einheit mit Roboterarm konzipiert wurde. Die für die Softwareentwicklung einkalkulierten Tätigkeiten umfassen dabei u. a. das Detektieren und Öffnen von Türen, Kollisionsvermeidung, Objekterkennung und -klassifikation sowie kontextsensitive Handlungsplanung. Die dafür geschätzten Entwicklungskosten belaufen sich auf knapp 14,5 bis etwas über 16 Mio. EUR. Daran angelehnt werden im Folgenden mittlere Kosten von 15 Mio. EUR für die Anwendungssoftware kalkuliert. Da seit dem Erscheinen der Fraunhofer-Studie der Umfang bestehender Softwarebibliotheken (z. B. ROS, OpenCV, u. a.) weiter zugenommen hat, ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Entwicklungskosten eher niedriger ausfallen werden. Diese Kosten verteilen sich auf die vom jeweiligen Herstellerunternehmen über den Produktlebenszyklus hinweg abgesetzte Menge von Robotern, die mit dieser Software ausgestattet werden. Mit einem durchaus typischen Produktlebenszyklus von drei Jahren für Consumer Electronics sind die Entwicklungskosten der Software auf die Absatzmenge der drei Jahre zu verteilen. Für die Abschätzung der Wertschöpfungspotenziale wird im nachfolgenden Kapitel der beginnende Massenmarkt ab einer jährlichen Absatzmenge von mindestens 1 Mio. Exemplaren definiert. Dabei ist davon auszugehen, dass sich diese Absatzmenge zu Beginn auf einige wenige Anbieter verteilt oder sich sogar auf einen einzigen Anbieter konzentriert. Bei drei Anbietern, auf die sich der Absatz gleichmäßig verteilt, entfallen damit auf jede Robotereinheit Software-Entwicklungskosten von 15 EUR. Erzielt ein einzelnes Unternehmen einen jährlichen Absatz von 1 Mio. bzw. 10 Mio. Exemplaren, sinkt dieser Betrag bereits auf fünf EUR bzw. 50 Cent.

Software-komponenten	Entwicklungskosten (in EUR)	Kosten je Einheit bei 1 Mio. Stück (in EUR)
Betriebssystem	–	4
Anwendungs-Software	15 Mio.	15

Tabelle 6: Die Kosten der Software-Komponenten unter der Annahme, dass die Entwicklungskosten auf jährlich 1 Mio. Roboter über drei Jahre umgelegt werden. Bei der Lizenzierung eines proprietären Betriebssystems entstehen keine Entwicklungskosten, jedoch Lizenzgebühren je verkaufter Einheit

4.8 Gesamtkosten und Endpreise

Die in diesem Kapitel beschriebenen Hardware-Komponenten repräsentieren nach Einschätzung der befragten Expertinnen und Experten ca. 80 bis 95 % der gesamten Materialkosten eines Serviceroboters. Zu den nicht berücksichtigten Komponenten gehören neben Kleinteilen wie Schrauben, Kabel, usw. auch die nicht gesondert erhobenen Komponenten der I/O-Einheit (insbesondere das WLAN- bzw. Bluetooth-Modul).

Werden die Preise über die Funktionsgruppen hinweg aufaddiert, können sich unter Berücksichtigung der fehlenden fünf bis 20 % für heutige Serviceroboter leicht Kosten von mehr als 26.500 EUR ergeben. Je nach Design und Wahl der Komponenten (entsprechend der jeweiligen Anforderungen) lassen sich diese jedoch bereits heute auf unter 4.500 EUR reduzieren. Die meisten Kosten entfallen dabei auf die Komponenten des Roboter-

arms. Diese allein können sich auf mehr als 23.000 EUR summieren. Im günstigsten Fall sind allerdings Kosten von unter 4.000 EUR möglich. Für eine mobile Einheit lassen sich die Kosten ebenfalls auf rund 15.000 EUR addieren. Dagegen lässt sich eine einfachere Version auch bereits mit Komponenten im Wert von unter 2.000 EUR fertigen.

Allerdings zeigen die Ergebnisse der Studie auch, dass die Preise bei hohen Stückzahlen in Zukunft deutlich fallen werden. Ausgehend von der Annahme, dass die erhobenen Komponentenkosten bis zu 95 % der gesamten Materialkosten abdecken, wird eine mobile Einheit bereits mit Komponenten im Wert von unter 500 EUR realisierbar sein. Die Komponenten für einen Roboterarm werden sich voraussichtlich auf unter 1.200 EUR begrenzen lassen. Bei einer Kombination aus mobiler Einheit und Roboterarm müssen insbesondere die Komponenten der Energieversorgung sowie der Rechereinheit jeweils nur einmal verbaut werden, so dass die Gesamtkosten geringer ausfallen als die Summe aus beiden Einzelösungen. Auch die Kosten für die Software fallen bei der Kombination aus mobiler Einheit und Roboterarm nur einmal an. Insgesamt belaufen sich damit die geschätzten Hard- und Softwarekosten eines mobilen Roboters mit 6-Achs-Manipulator zukünftig auf unter 1.400 EUR. Dabei stellen insbesondere die Elektromotoren für die Roboterarme einen entscheidenden Kostenfaktor dar, wohingegen für die mobile Einheit die Sensorik der größte Preistreiber ist (siehe Abbildung 1).

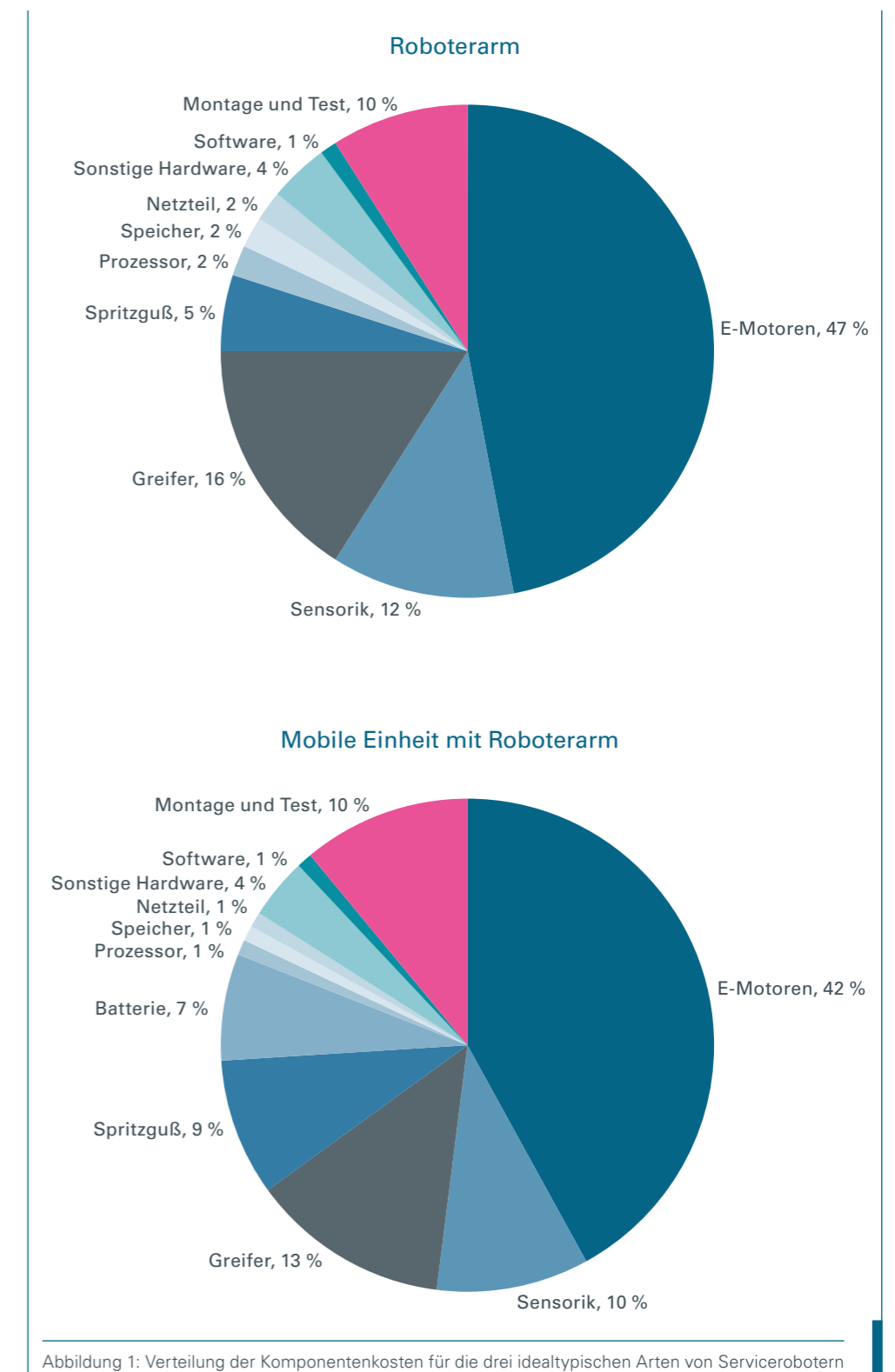
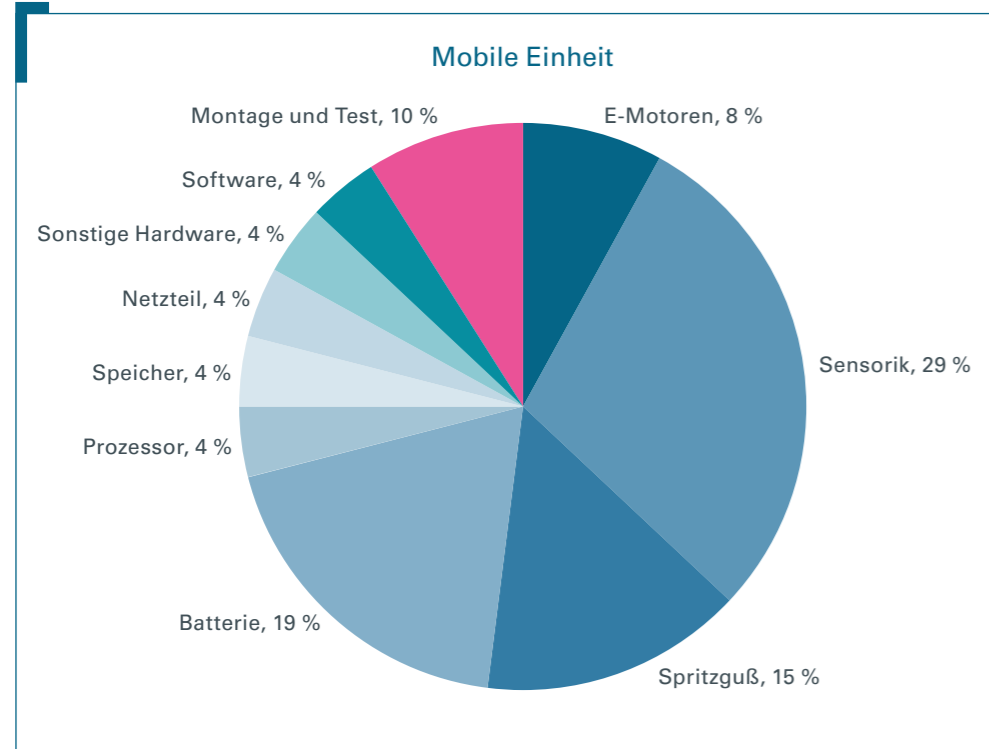


Abbildung 1: Verteilung der Komponentenkosten für die drei idealtypischen Arten von Servicerobotern

Noch offen sind die Fragen nach der Endmontage und dem Verkaufspreis. Im Bereich der Unterhaltungselektronik zeigen Analysen aktueller Smartphones, dass deren Verkaufspreise rund das 2,5-fache bis 3-fache der Herstellungskosten betragen. Die Kosten für die Endmontage sowie Tests und Hilfsmaterialien liegen dabei unter 10 % der Herstellkosten (z. B. techinsights, 2019 a, b). Die Endmontage von Smartphones und Tablets ist bisher noch relativ wenig automatisiert und beruht vor allem auf manueller Arbeit (vgl. z. B. tn3, 2020). In den nachfolgenden Berechnungen wird daher davon ausgegangen, dass auch die Materialkosten der Serviceroboter rund 90 % der Herstellungskosten darstellen. Die übrigen 10 % werden der Endmontage, Tests sowie weiteren Hilfsmaterialien zugeschrieben. Die Verkaufspreise der unterschiedlichen Serviceroboter im Massenmarkt werden wiederum auf das dreifache der Herstellungskosten geschätzt. Die Differenz zwischen den jeweiligen Herstellungskosten und dem Verkaufspreis beinhaltet die Gewinnmarge des Herstellerunternehmens, die Händlermarge, insofern die Roboter nicht im Direktvertrieb angeboten werden, sowie weitere Kostenblöcke wie Marketing und Vertrieb als auch den Kundendienst. Zu letzterem gehören insbesondere das Erbringen von Garantie- und Gewährleistungen sowie etwaige Updates der Software.

Insgesamt ergibt sich ein Verkaufspreis für eine mobile Einheit von etwas unter 1.600 EUR. Ein Roboterarm könnte nach dieser Berechnung für knapp über 3.800 EUR angeboten werden. Ein mobiler Roboter mit Manipulator wäre für rund 4.600 EUR erhältlich (siehe Tabelle 7).

Angesichts aktueller Preise von Produkten im Bereich der Unterhaltungselektronik ist davon auszugehen, dass die hier geschätzten Preise die Erschließung des Massenmarkts prinzipiell zulassen, insofern die Funktionalität des Roboters tatsächlich das Bedürfnis der Kundinnen und Kunden befriedigt.

Komponenten	Stückkosten je Roboter in EUR		
	Mobile Einheit	Roboterarm	Mobile Einheit mit Roboterarm
E-Motoren	40	600	640
Sensorik	155	155	155
Greifer	0	200	200
Spritzguss	80	60	140
Batterie	100	0	100
Prozessor	20	20	20
Speicher	20	20	20
Netzteil	20	20	20
Sonstige Hardware	23	57	68
Software	19	19	19
Montage und Test	51	126	151
Herstellkosten	528	1.276	1.534
Verkaufspreis	1.583	3.829	4.601

Tabelle 7: Komponentenkosten und Verkaufspreise von Servicerobotern im Massenmarkt (unter der Annahme, dass 1 Mio. Roboter im Jahr abgesetzt werden)

5 Wertschöpfungspotenziale für deutsche Roboter- und Komponentenhersteller

Entscheidend für die Frage nach den Wertschöpfungspotenzialen für deutsche Unternehmen in einem Massenmarkt der Servicerobotik sind insbesondere zwei Aspekte: die Absatzzahlen und damit die Umsatzpotenziale für Roboter und deren Komponenten sowie die Möglichkeiten deutscher Industrieunternehmen, sich erfolgreich an diesen Märkten zu beteiligen.

Wir gehen bei der Potenzialbetrachtung außerdem davon aus, dass es Endhersteller von Servicerobotern geben wird, die alle oder zumindest die allermeisten Hardware-Komponenten von Zulieferern beziehen. Wir betrachten damit sowohl das Marktpotenzial für das Endprodukt Serviceroboter als auch für seine wichtigsten materiellen Komponenten wie Motoren, Sensorik, etc. Bei der Software wandelt sich das Bild. Hier werden die Endhersteller vermutlich auf Open Source-Betriebssysteme und Eigenentwicklung der grundlegenden Anwendungs-Software setzen, so dass nicht absehbar ist, dass hier zunächst ein separater Zulieferermarkt für Softwarehäuser entstehen wird. Anders sieht das allerdings aus, wenn ein Ökosystem für Anwendungen von Dritten für die Roboter entsteht. Diesen Fall diskutieren wir genauer im folgenden Kapitel 6.

5.1 Marktpotenziale für Komponenten und Endprodukte

Um das mögliche Umsatzpotenzial für Serviceroboter und deren Komponenten im Massenmarkt abschätzen zu können, müssen zunächst einige Annahmen über die zukünftig absetzbaren jährlichen Stückzahlen von Servicerobotern getroffen werden. Hierfür werden im Folgenden drei unterschiedliche Szenarien für den Weltmarkt betrachtet:

- A: eine Million
- B: zehn Millionen
- C: einhundert Millionen verkaufte Exemplare pro Jahr

Eine Million Exemplare entsprechen dabei ungefähr dem Absatz des ersten iPhones zur Markteinführung im Jahr 2007 (Business Wire, 2019) bzw. der Küchenmaschine Thermomix der Firma Vorwerk im Jahr 2016 (Handelsblatt, 2016). Szenario A lässt sich somit als beginnender Massenmarkt mit zunächst einem oder wenigen Anbieterunternehmen (Roboterhersteller) verstehen.

Der Absatz in Höhe von zehn Millionen Exemplaren in Szenario B korrespondiert in etwa mit dem Absatz von Fernsehgeräten auf dem Konsumentenmarkt in Deutschland im Jahr 2011 (gfu, 2020). Dieses Szenario lässt sich als ein eher gering entwickelter Massenmarkt, mit noch wenigen Herstellerunternehmen bzw. als Übergangsszenario hin zu einem voll entwickelten Massenmarkt, deuten.

Einhundert Millionen verkaufte Exemplare korrespondieren dagegen mit dem weltweiten Absatz von intelligenten Lautsprechern im Jahr 2018 (IDC, 2019) bzw. mit der Hälfte der weltweit verkauften Menge an Kühlschränken im Jahr 2019 (statista, 2020). Szenario C lässt sich somit als vollständig entwickelter Massenmarkt mit einer Vielzahl konkurrierender Anbieterunternehmen interpretieren.

Auch die Verteilung der Verkaufszahlen auf die einzelnen Robotik-Anwendungen – mobile Einheit, Roboterarm bzw. Kombination aus mobiler Einheit und Roboterarm – ist a priori unklar, so dass zunächst von einer Gleichverteilung ausgegangen wird. Somit entfällt in allen Szenarien auf jede der drei Varianten ein Drittel der angenommenen Stückzahlen. Die Preise der Komponenten wurden für sehr hohe Stückzahlen geschätzt. Beim Übergang von Szenario A zu Szenario B bzw. C wird dagegen keine zusätzliche Stückkostendegression einkalkuliert. Dafür gibt es zwei Gründe: Einerseits hat die Stückkostendegression eine Grenze, ab der ein zusätzlicher Output keinen nennenswerten Rückgang der Stückkosten mehr erwirkt. Zweitens steigt in den betrachteten Szenarien mit der Ausbringungsmenge aller Voraussicht nach auch die Anzahl der Roboterhersteller, so dass für einzelne Unternehmen die Stückzahlen nicht im gleichen Verhältnis zunehmen.

Auf Basis dieser Annahmen zeigt Tabelle 8 die Wertschöpfungspotenziale für die Anbieter von Komponenten sowie für die Roboterhersteller.⁷ Für letztere ergibt sich im mittleren Szenario bereits ein erhebliches Marktvolumen in Höhe von rund 33,4 Mrd. EUR. Das mit Abstand größte Potenzial auf Ebene der Komponenten zeichnet sich für den Bereich der Elektromotoren ab, welches mehr als 40 % des gesamten Wertschöpfungspotenzials aller Einzelkomponenten entspricht. Dahinter folgt die Sensorik mit einem bereits deutlich geringeren Wertschöpfungsanteil. Unter der Prämisse, dass auch im Massenmarkt MRK-Greifer zum Einsatz kommen und nicht zugunsten eines günstigeren Preises auf eine intelligente Greiftechnik verzichtet wird, steht an dritter Stelle das Potenzial für die Anbieter von Endeffektoren. Das genaue Wertschöpfungspotenzial für die Fertigung der Spritzgussteile, wie z. B. für das Fahrgestell und die Räder der mobilen Einheit bzw. für die einzelnen Glieder des Roboterarms, hängt insbesondere von der Konstruktion der Bauteile, den benötigten Werkzeugen (Formenbau) sowie insbesondere auch von der Art und Menge des verwendeten Materials ab. Es folgt das Wertschöpfungspotenzial für die Batteriefertigung, welches weniger als ein Sechstel des Potenzials der E-Motoren beträgt. Die geringste Wertschöpfung ergibt sich für die Fertigung von Prozessoren, Fest- und Arbeitsspeichern sowie Ladegeräten bzw. Netzteilen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ein voll entwickelter Massenmarkt, so wie Szenario C diesen abbildet, mit erheblichen Wertschöpfungspotenzialen verbunden ist. Aus volkswirtschaftlicher Perspektive besonders relevant sind dabei Hersteller von Servicerobotern, da sich für diese naturgemäß die größten Potenziale ergeben. In Szenario C mit 100 Mio. abgesetzten Exemplaren sind dies rund 334 Mrd. EUR. Darüber hinaus sind in diesem Szenario insbesondere die Potenziale für Anbieterunternehmen von Elektromotoren, Sensoren und Greiftechnik von volkswirtschaftlicher Bedeutung. Weit weniger vielversprechend sind dagegen die Potenziale, die sich aus den beiden Szenarien A und B ergeben, umso mehr da sich diese voraussichtlich auf verschiedene Anbieterunternehmen aus unterschiedlichen Ländern verteilen werden. Volkswirtschaftliche Bedeutung entfalten hierbei fast ausschließlich die Potenziale für Roboterhersteller.

⁷ Daneben ergeben sich aber auch Wertschöpfungspotenziale in anderen Branchen, wie z. B. für die Herstellung von Fertigungsanlagen für die Roboterhersteller. Deutsche Unternehmen, die in dieser Branche traditionell gut aufgestellt sind, können prinzipiell Roboterhersteller weltweit beliefern und dadurch von einer einsetzenden Massenproduktion profitieren.

Komponenten	Wertschöpfungspotenzial in Mio. EUR bei Stückzahlen in Höhe von		
	1.000.000	10.000.000	100.000.000
E-Motoren	427	4.267	42.667
Sensorik	155	1.550	15.500
Greifer	133	1.333	13.333
Spritzguss	93	933	9.333
Batterie	67	667	6.667
Prozessor	20	200	2.000
Speicher	20	200	2.000
Netzteil	20	200	2.000
Sonstige Hardware	49	492	4.921
Umsatzpotenzial Roboterhersteller	3.338	33.377	333.770

Tabelle 8: Wertschöpfungspotenziale für Roboter- und Komponentenhersteller im Massenmarkt

5.2 Chancen deutscher Unternehmen für die Marktteilnahme

Da sich die Teilmärkte für Endprodukte und Teilkomponenten deutlich voneinander unterscheiden, betrachten wir die Chancen deutscher Unternehmen, sich erfolgreich im Massenmarkt der Servicerobotik zu etablieren, jeweils getrennt voneinander. Größtes Unterscheidungsmerkmal ist die Ausrichtung: Während sich Roboterhersteller auf die Konsumentinnen und Konsumenten fokussieren, konzentrieren sich Zulieferunternehmen für Elektromotoren, Sensorik etc. auf Roboterhersteller im B2B-Geschäft (siehe Abbildung 2).

5.2.1 Endprodukt Serviceroboter

Das größte Wertschöpfungspotenzial im Massenmarkt der Servicerobotik bietet sich für die Hersteller der Robotik-Anwendungen. Diese müssen neben der Produktion der Roboter auch die dazugehörige Hard- und Software-Entwicklung, Zertifizierung und Zulassung sowie Vertriebs- und Logistikprozesse sicherstellen. Welche Unternehmen sich zukünftig als Anbieter im Massenmarkt der Servicerobotik positionieren und durchsetzen werden, lässt sich aus heutiger Sicht nur grob abschätzen. Jedoch rücken dabei verschiedene Akteursgruppen in den Blick.

Zunächst kommen dabei Unternehmen aus der Unterhaltungselektronik sowie Hersteller elektronischer Haushaltsgeräte (weiße Ware) als potentielle Roboterhersteller in Betracht. Ein Blick nach Japan zeigt, dass Unternehmen aus diesen Branchen bereits mit eigenen Anwendungen in den Markt der Servicerobotik vorstoßen. Beispielhaft lässt sich hier auf Panasonic mit dem Telepräsenzroboter Hospi-Rimo verweisen (Panasonic, 2019). Vieles spricht dafür, dass sich auch in Deutschland zukünftige Roboterhersteller aus dieser Gruppe von Unternehmen rekrutieren werden. Zunächst einmal betätigen sich einige der deutschen Unternehmen bereits in diesem Markt, wobei sich deren Angebote bislang vorwiegend auf Staubsaug- und Rasenmäroboter beschränken. Der intensive (Preis-) Wettbewerb im Massenmarkt ist ihnen ebenfalls vertraut. Darüber hinaus verfügen diese

Unternehmen über die Erfahrung in der Produktion von Haushaltsgeräten in vergleichbarer Größe und sind sowohl organisatorisch als auch finanziell in der Lage, die entsprechenden Produktionslinien zu planen und umzusetzen. Auch wäre eine Vernetzung bestehender Haushaltsgeräte mit Servicerobotern für diese Unternehmen einfacher zu bewerkstelligen, da sie entsprechende Schnittstellen in ihre etablierten Produkte integrieren könnten. Deutsche Herstellerunternehmen von elektronischen Haushaltsgeräten erwirtschafteten im Jahr 2019 einen Umsatz von mehr als 9,4 Mrd. EUR. Der Exportanteil von mehr als 50 % unterstreicht die internationale Wettbewerbsfähigkeit. Hinzu kommen weitere 3,2 Mrd. EUR Umsatz deutscher Unternehmen aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik. Auch deren Exportanteil lag bei rund 45 % (Destatis, 2020). Insgesamt kann diesen Unternehmen damit eine aussichtsreiche Ausgangslage für die Entwicklung hin zu Roboterherstellern im Massenmarkt der Servicerobotik attestiert werden.

Mindestens so gut ist die Ausgangssituation der Hersteller von Elektrowerkzeugen. Diese besitzen ebenfalls die Expertise im B2C-Geschäft, kennen den dort herrschenden Preisdruck und verfügen ebenso über die Kenntnisse und Ressourcen zum Aufbau einer skalierbaren Produktion. Darüber hinaus bieten sich für diese Unternehmen ggf. Synergieeffekte aufgrund der Nutzung gleicher Komponenten. So sind heutzutage bereits häufig die Akkus unterschiedlicher Werkzeuggeräte eines Herstellerunternehmens austauschbar, so dass sich zukünftig bspw. die Akkus eines Rasenmähers auch in einem Serviceroboter verwenden ließen. Zudem haben die Werkzeughersteller das Potenzial zur vertikalen Integration, d. h. sie können insbesondere vorgelagerte Wertschöpfungsstufen selbst übernehmen. Beispielsweise fertigen Anbieterunternehmen von Elektrowerkzeugen zum Teil die Elektromotoren selbst. In Deutschland gab es im Jahr 2019 insgesamt 31 Herstellerunternehmen von handgeführten Werkzeugen mit Motorantrieb (elektrisch und nicht elektrisch) mit insgesamt mehr als 13.200 Beschäftigten. Diese erwirtschafteten im gleichen Jahr einen Umsatz in Höhe von fast 5,4 Mrd. EUR (Destatis, 2020). Dass davon rund 84 % im Ausland realisiert wurden, unterstreicht die internationale Ausrichtung dieser Unternehmen. Damit bieten sich deutschen Unternehmen dieser Branche prinzipiell sehr gute Voraussetzungen, um sich im Massenmarkt der Servicerobotik als Anbieter zu etablieren.

Der Blick nach Japan verrät zudem, dass auch Automobilhersteller als potenzielle Anbieterunternehmen von Servicerobotern in Betracht kommen. So begann Honda bereits in den 1980er Jahren mit der Entwicklung humanoider Roboter. Im Jahr 2000 stellte Honda den Roboter ASIMO vor. Dessen Entwicklung wurde zwar im Jahr 2018 eingestellt (Pluta, 2018), die gewonnenen Erkenntnisse könnten jedoch in zukünftige Entwicklungen einfließen. Auch Toyota ist bereits im Bereich der Servicerobotik in Erscheinung getreten. Für den Roboter Kirobo entwickelte das Unternehmen die Spracherkennung (Toyota, 2013). Den kleinen Kommunikations-Roboter Kirobo Mini vertreibt Toyota seit 2017 auch selbst (Toyota, 2017). Während das Engagement japanischer Automobilhersteller generell auch auf die „japanische Roboter-Kultur“ (Kovacic, 2018) zurückzuführen ist, sind deutsche Automobilhersteller im Bereich der Servicerobotik bisher deutlich zurückhaltender. Bei BMW werden in der Logistik die, gemeinsam mit dem Fraunhofer IML entwickelten, Smart Transport Robots (STR) eingesetzt. Nachdem sich externe Nachfragen nach diesen Robotern häuften, denkt BMW zumindest über einen Vertrieb der Roboter nach (Tiedemann, 2019). Für den

privaten Anwendungsbereich sind dagegen noch keine Servicerobotik-Entwicklungen aus der deutschen Automobilbranche bekannt. Auch wenn deutsche Automobilhersteller prinzipiell über die notwendigen Ressourcen verfügen, sind sie damit zum jetzigen Zeitpunkt eher nicht zum engeren Kreis der aussichtsreichsten Servicerobotik-Hersteller zu zählen.

Als weitere Gruppe potenzieller Anbieterunternehmen sind ganz allgemein Unternehmensneugründungen (Start-ups) zu nennen, die sich explizit auf diesen Markt fokussieren. So sind derzeit etwa ein Viertel aller Roboterunternehmen Start-ups (IFR, 2019). Unternehmensneugründungen aus Deutschland konzentrieren sich bisher vor allem auf den B2B-Bereich. Das Anwendungsspektrum umfasst dabei insbesondere die Logistik (z. B. Magazino), die Gebäudereinigung (z. B. Adlatus Robotics) oder die Telepräsenz (z. B. Mojin). Ob Start-ups aus Deutschland auch im Konsumentenmarkt der Servicerobotik eine entscheidende Rolle spielen werden, ist dagegen zweifelhaft. Für die Großserienproduktion sind erhebliche Investitionen notwendig. Auch sogenannte Fables Companies, deren Produktion komplett an externe Dienstleister ausgelagert ist, müssen zumindest die zu produzierenden Einheiten vorfinanzieren. Dazu kommt ein hinreichend großes Marketingbudget für den Vertrieb der Produkte. Damit sind für den Erfolg im Massenmarkt erhebliche finanzielle Ressourcen notwendig. Große Finanzierungsrunden sind in Deutschland und Europa aber rar. Europäische Start-ups erhalten im Vergleich zu denen aus den USA in Spätphasen-Finanzierungsrunden im Mittel rund 10 Mio. EUR weniger Kapital (BVK, I.E.F, Roland Berger, 2018). Während relativ niedrige bis mittlere Stückzahlen im B2B-Bereich sowie ein organisches Wachstum für Start-ups realisierbar sind, verfügen sie in der Regel nicht über das notwendige Knowhow und die Ressourcen zum schnellen Aufbau einer Großserienproduktion. Damit sehen sich Neugründungen deutscher Serviceroboterhersteller für den Massenmarkt hohen Markteintrittsbarrieren gegenüber.

Daneben sind als potenzielle Roboterhersteller prinzipiell auch die bereits bestehenden deutschen Industrie- und Servicerobotik-Hersteller zu nennen. Da diese jedoch sehr stark auf die Bedürfnisse der Industrie ausgerichtet sind, erscheint es zum jetzigen Zeitpunkt eher fraglich, ob sich diese Unternehmen auch auf die sehr spezifischen Anforderungen des B2C-Geschäfts einlassen werden. Dabei kämen auf die Unternehmen größere Umstellungen in der Unternehmenskultur sowie in ihrer strategischen Ausrichtung zu.

5.2.2 Elektromotoren

Das größte Wertschöpfungspotenzial auf Komponentenebene bietet sich für die Herstellerunternehmen von Elektromotoren. In Deutschland gab es im Jahr 2019 laut Statistischem Bundesamt (Destatis, 2020) 243 Hersteller von Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren mit mehr als 70.000 Beschäftigten. Der gesamte Umsatz der Branche lag 2019 bei mehr als 17 Mrd. EUR wovon rund 58 % mit dem Ausland realisiert wurden. Unter den deutschen Anbietern von Elektromotoren finden sich sowohl Großunternehmen als auch kleine und mittlere Unternehmen. Insbesondere Automobilzulieferunternehmen, die Servo-Antriebe bereits in Großserie produzieren, könnten dabei ihre Erfahrungen in den Massenmarkt der Servicerobotik transferieren. Diese Unternehmen sind es zudem gewohnt einem intensiven Preiswettbewerb standzuhalten. Deutschland hat damit das Potenzial, im Massenmarkt der Antriebstechnik für die Servicerobotik eine führende Rolle einzunehmen.

5.2.3 Sensortechnik

Deutsche Unternehmen zählen traditionell zu den führenden Anbietern in der Sensorik-Branche. Die ca. 800 in Deutschland ansässigen Sensorhersteller beliefern insgesamt rund 20 bis 30 % des weltweiten Sensormarktes. Die überwiegende Mehrheit dieser Unternehmen sind spezialisierte KMU. Im Branchenverband AMA sind insgesamt mehr als 400 überwiegend mittelständische Unternehmen organisiert, die rund 100.000 Mitarbeitende beschäftigen und einen Umsatz von rund 10 Mrd. EUR erwirtschaften. Der Massenmarkt für Sensoren wird dagegen von großen Konzernen dominiert, die mit ihren kostengünstigen Halbleitertechnologien Sensoren in Großserien produzieren. In Deutschland sind dies insbesondere Automobilzulieferer wie Bosch und Continental (AMA, 2018, iit 2013b).

Ob sich im preisgetriebenen Massenmarkt Chancen für deutsche KMU bieten werden, bleibt vorerst offen. Diese sind in der Regel spezialisiert auf die Fertigung von Sensoren mit hoher Genauigkeit, großem Arbeitsfrequenzbereich sowie besonderer Robustheit und Verlässlichkeit. Der Massenmarkt ist dagegen eher gekennzeichnet durch miniaturisierte Abmessungen der Sensoren, geringen Energieverbrauch und eine außerordentlich kostengünstige Großserienfertigung. Dagegen spielen Messgenauigkeit, Verlässlichkeit, Robustheit und Lebensdauer im Massenmarkt bisher eine untergeordnete Rolle (AMA, 2018).

5.2.4 Greiftechnik

Der Markt für Endeffektoren als Untersegment des Robotik-Markts ist von diesem nur schwer abzugrenzen. Umsatz- und Beschäftigtenzahlen lassen sich damit nicht den offiziellen Statistiken entnehmen. Schätzungen gehen für das Jahr 2018 von einem Marktvolumen in Höhe von mehr als 2,5 Mrd. USD aus (Wadhvani und Saha, 2019). Deutsche Unternehmen gehören dabei weltweit zu den führenden Anbietern. Damit bieten sich für deutsche Firmen prinzipiell gute Chancen, auch im zukünftigen Massenmarkt einen relevanten Marktanteil zu erringen. Wie in vielen anderen Bereichen sind deutsche Anbieter jedoch auf qualitativ hochwertige Produkte im eher gehobenen Preissegment spezialisiert. Die tatsächlichen Chancen deutscher Unternehmen hängen damit nicht unerheblich davon ab, ob sich die spätere Nachfrage auf qualitativ hochwertige oder eher günstige Greiftechnik konzentrieren wird.

5.2.5 Kunststoffspritzguss

Stand 2019 gibt es in Deutschland laut Statistischem Bundesamt mehr als 840 Betriebe im Wirtschaftszweig „Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren“, die u. a. Spritzgussteile für den Fahrzeugbau sowie für Haushalts- und Spielzeugwaren herstellen. Die überwiegende Mehrheit dieser Firmen sind KMU. Insgesamt erwirtschafteten sie einen Umsatz in Höhe von mehr als 22 Mrd. EUR und beschäftigten dabei rund 135.000 Mitarbeitende. Der Exportanteil am Umsatz der Branche lag zuletzt bei rund 37 % (Destatis, 2020). Mehr als 80 % der Exporte der deutschen Kunststoffindustrie gingen nach Europa. Auf Asien und Amerika entfielen dagegen nur rund 15 % der Exporte (PlasticsEurope Deutschland, 2019).

Gerade für deutsche bzw. europäische Hersteller von Servicerobotern kommen bei der Fertigung von Fahrgestell und Rädern auch Zulieferer aus Deutschland in Betracht. Da

der Wettbewerb vor allem über den Preis geführt wird, haben deutsche Unternehmen bei einfachen Massenprodukten klare Kostennachteile und müssen vor allem mit innovativen Produkten sowie effizienten Produktionsverfahren dagegenhalten. Marktchancen für Kunststoff verarbeitende Unternehmen bieten sich daher insbesondere durch Innovation und Qualität (Dispan und Vassiliadis, 2014). Kundennähe, kurze Lieferzeiten und geringe Transportkosten sowie ein hoher Automatisierungsgrad können somit dazu beitragen, die Lohnkostenvorteile asiatischer Anbieter zu kompensieren. Dies gilt jedoch ausschließlich für die Belieferung europäischer Hersteller. Dass amerikanische oder asiatische Roboterhersteller auf deutsche Zulieferfirmen setzen, ist dagegen als unwahrscheinlich anzusehen.

5.2.6 Batterien

Deutschland verfügt aktuell im internationalen Vergleich lediglich über geringe Fertigungskapazitäten für Batteriezellen. Im Jahr 2019 erwirtschafteten in Deutschland 27 Herstellerunternehmen von Batterien und Akkumulatoren mit knapp über 9.000 Beschäftigten einen Umsatz von rund 3,8 Mrd. EUR. Dies entspricht in etwa 4,5 % des Weltmarkts (Avicenne Energy, 2020). Die größten Batteriehersteller kommen derzeit aus Asien. Dazu gehören Unternehmen wie z. B. Panasonic aus Japan, LG Chem und Samsung SDI aus Südkorea oder CATL und BYD aus China. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) verfolgt jedoch das ehrgeizige Ziel, bis zum Jahr 2030 ca. 30 % der weltweiten Nachfrage nach Batteriezellen aus deutscher und europäischer Produktion zu bedienen (BMWi, 2018).

Dass deutsche Anbieter prinzipiell über das Potenzial verfügen, mit hoch spezialisierten Angeboten im Massenmarkt gegen die Konkurrenz aus Asien zu bestehen, zeigt das Beispiel von Varta. Deren Lithium-Ionen-Knopfzellen weisen eine besonders hohe Energiedichte auf und verschaffen dem Unternehmen damit einen klaren Wettbewerbsvorteil, auch gegenüber der Konkurrenz aus Asien. Ob sich deutsche Anbieter allerdings auch in nennenswertem Umfang im Massenmarkt der Servicerobotik durchsetzen werden, kann zum jetzigen Zeitpunkt nur spekuliert werden. Potenziale können sich dabei auch durch unternehmensübergreifende Akku-Plattformen bieten, wie die der kürzlich bekanntgegebenen Allianz zwischen Bosch und Gardena (Bosch, 2020).

5.2.7 Prozessoren, Fest- und Arbeitsspeicher

Der Markt für Fest- und Arbeitsspeicher wird überwiegend von US-amerikanischen sowie japanischen, südkoreanischen und chinesischen Unternehmen dominiert. Chancen für deutsche Anbieter, in einem zukünftigen Markt für Serviceroboter relevante Marktanteile zu erlangen, sind daher nicht zu erkennen. Auch die führenden Hersteller von Prozessoren kommen aus den USA. Dass sich dies in Zukunft ändern könnte, ist auch hier eher unwahrscheinlich.

Dagegen kommen mehrere der bekanntesten Einplatinencomputer aus Europa, darunter Arduino, Raspberry Pi sowie Tinkerforge aus Deutschland. Sollte sich der Trend zu Embedded Systems in einem zukünftigen Massenmarkt für Serviceroboter weiter etablieren, wären hier Chancen für deutsche Anbieter prinzipiell gegeben.

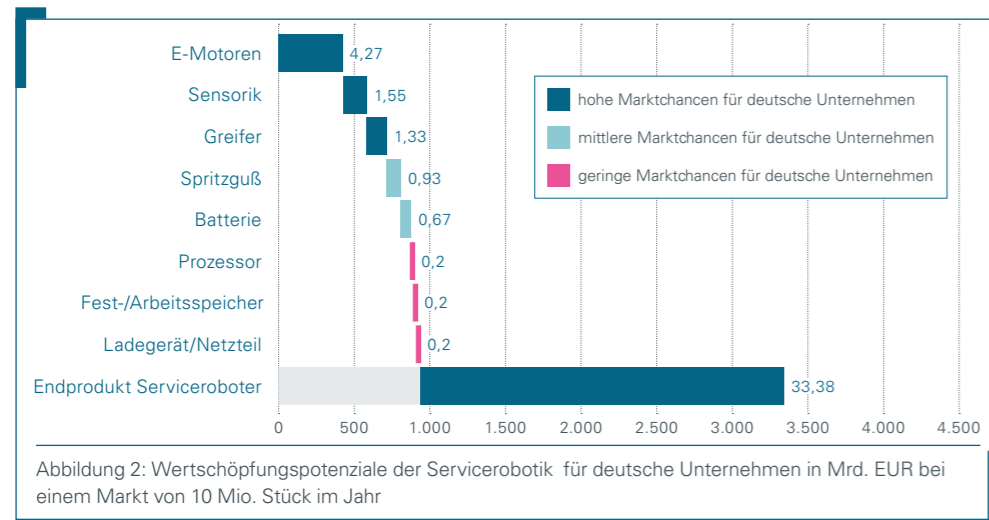
5.2.8 Software

Beim Marktpotenzial für die Software muss zwischen Betriebssystem, grundlegender Anwendungssoftware und Anwendungen aus einem App Store unterschieden werden.

Bei den Betriebssystemen ist das Potenzial stark begrenzt. Hier ist zwar zumindest denkbar, dass manche Hersteller proprietäre Betriebssysteme lizenzieren werden. Zu vermuten wäre aber, dass viele Endhersteller auf Open Source-Betriebssysteme auf Linux-Basis mit Echtzeiterweiterungen zurückgreifen werden, um nicht in eine zu enge Abhängigkeit zu geraten (Aspencore, 2019). Ohnehin kommt keiner der großen Hersteller von Echtzeitbetriebssystemen aus Deutschland.

In anderen Märkten für hochwertige Verbrauchsprodukte wie Fernseher oder weiße Ware ist es seit längerem üblich, dass die Endhersteller die Anwendungssoftware selbst entwickeln. Das betrifft sowohl die Steuerungs-Software als auch die Bedienschnittstelle. Hier werden, wenn überhaupt, externe Entwicklungsdienstleister für Individualentwicklungen eingebunden. Diese Dienstleister sind häufig auch noch konzerngebunden. Der Einkauf von vorkonfektionierte Standardsoftware von unabhängigen Anbietern findet dagegen nicht statt. Eine ähnliche Entwicklung ist auch für die hier betrachteten Serviceroboter zu erwarten. Die Entwicklung eines relevanten Markts für die externe Entwicklung der grundlegenden Anwendungssoftware ist somit nicht absehbar.

Ein echtes Potenzial gibt es nur für Apps in einem möglichen Ökosystem der Servicerobotik. Darauf gehen wir im folgenden Kapitel ein.



6 Das Potenzial für ein Ökosystem der Servicerobotik

Auch wenn die Hardware-Komponenten eines Serviceroboters, insbesondere Motoren, Sensorik und Greifer, die wesentlichen Kostenblöcke des Gesamtsystems bilden, wird gleichwohl der Software eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung im Massenmarkt zukommen. Die Hardware eines Serviceroboters allein kann noch keine Tätigkeiten verrichten. Erst die Software – insbesondere auch KI-Anwendungen – ermöglichen den sinnvollen Einsatz eines Roboters. Ohne die entsprechende Software kann es somit kein attraktives Leistungsangebot geben und ohne dieses wird sich keine massenhafte Nachfrage entwickeln. Allen Software-Komponenten gemein ist dabei, dass diese zwar mit erheblichem Entwicklungsaufwand und damit hohen Fixkosten verbunden sind, die variablen Kosten aber gegen Null gehen. Jede weitere verkaufte Einheit verursacht damit keine zusätzlichen Kosten. Um die hohen Entwicklungskosten auf eine möglichst große Zahl von Kundinnen und Kunden verteilen zu können, ist der Massenmarkt wiederum Voraussetzung.

Aus Sicht der Nutzerinnen und Nutzer ist vor allem die Anwendungs-Software von Bedeutung. In einer Basisversion wird sie notwendigerweise vom Hersteller selbst bereitgestellt, damit das Produkt beim Kauf funktionsfähig ist und einen Nutzwert bietet. Gut denkbar ist aber auch, dass zukünftig in eigenen App-Stores kostenpflichtig weitere Software-Anwendungen für Serviceroboter angeboten werden, so wie es heute sehr erfolgreich bei den Smartphones praktiziert wird. Damit eröffnen sich ganz neue Anwendungs- und Monetarisierungsszenarien. Denkbar wäre so z. B. eine Reinigungs-App die eventuell sogar gemeinsam mit dem passenden Werkzeug und den benötigten Reinigungsmitteln im monatlichen Abonnement erhältlich ist. Prinzipiell sind dabei Apps für alle erdenklichen Anwendungen sowie unterschiedlichste Geschäftsmodelle vorstellbar.

Damit wird auch ersichtlich, dass neben den eigentlichen Herstellern insbesondere die Betreiber der App Stores und die Anbieter der Apps von einem sich entwickelnden Massenmarkt der Servicerobotik profitieren können. Der Vergleich zu Smartphones und mobile Apps drängt sich dabei auf. Laut App Annie (2020) summieren sich die App-Store-Konsumausgaben im Jahr 2019 weltweit auf 120 Mrd. USD. Damit hat sich das Umsatzvolumen seit 2016 nahezu verdoppelt (App Annie, 2017) und entspricht mittlerweile ca. 30 % des Umsatzes mit Smartphones (Counterpoint Research, 2020). Sollte sich ein entsprechender Markt für Serviceroboter-Apps entwickeln, ist davon auszugehen, dass damit ebenfalls ein erhebliches Wertschöpfungspotenzial verbunden sein wird.

Voraussetzung für das Entstehen eines solchen App-Ökosystems ist ein universell nutzbares Gerät (analog zum Smartphone), d.h. verschiedene Anbieter müssten ein standardisiertes semantisches Metamodell der Software und der Hardware verwenden, so dass sich diese mit derselben App steuern ließe. Software-Frameworks wie das Robot Operating Systems (ROS) könnten dafür eine technische Basis bereitstellen. Ob das so geschieht ist aus heutiger Sicht noch offen. Wenn es dazu kommen soll, sind zwei Umsetzungswege möglich. Im ersten Fall etabliert ein Roboterhersteller als Pionier eine Systemarchitektur mit einem eigenen, aber offen gelegten Metamodell für Hardware und Software, um externen App-Herstellern die Arbeit zu erleichtern, baut einen eigenen App-Store auf und erlaubt dann anderen Roboterhersteller ebenfalls die Nutzung der Architektur und des App Stores. In ähnlicher Form hat IBM in den 1980er Jahren seine PC-Architektur am Markt durchgesetzt. Vorteil für den Pionier ist, dass er die technischen Standards für den gesamten Markt setzen kann und mit seinem provisionspflichtigen App Store am Geschäft der Wettbewerber partizipiert.

Im zweiten Fall einigen sich mehrere Hersteller auf einen gemeinsamen Standard für ein semantisches Metamodell von Hardware und Software. Das Beispiel des Betriebssystems Unix zeigt die Herausforderungen, aber auch die Möglichkeiten dieses Weges. Während in den sogenannten Unix Wars der 1980er und 1990er Jahren die verschiedenen Hersteller von lizenzpflichtigen Unix-Varianten an der Standardisierung ihrer Betriebssysteme weitgehend gescheitert sind, hat sich die Open Source-Variante Linux mittlerweile zu einem Industriestandard für Server und eingebettete Systeme entwickelt. In der Servicerobotik arbeiten mehrere Projekte im BMWi-Technologieprogramm PAiCE an Plattform-Ansätzen, die in die Richtung einer herstellerübergreifenden Abstraktion von Hardware und Software weisen. Über die Plattform des Projekts ROBOTOP können standardisierte Hardware-Komponenten aufbauend auf erprobten Best-Practice Beispielen zu individuellen Lösungen für die Industrieautomatisierung kombiniert werden.⁸ In RoboPORT wird eine kollaborative Entwicklungsumgebung mit Community-Bereich für Crowd-Engineering-Projekte entwickelt.⁹ Die Plattform des Projekts SeRoNet schließlich bringt Anbieter von Hardware- und Softwarekomponenten, Systemintegratoren und professionelle Anwender der Servicerobotik etwa aus Industrie, Logistik und Gesundheitswirtschaft in einem Modell-basierten Entwicklungsprozess zusammen.¹⁰

Welche Unternehmen oder Organisationen könnten Betreiber von App Stores für die Servicerobotik sein? Ein reines Open Source-Szenario ohne Kontrollinstanz für einen App Store ist ebenso unwahrscheinlich wie ein Szenario mit einem völlig geschlossenen System (Walled Garden), bei dem die Apps lediglich für die Hardware eines einzelnen Herstellerunternehmens angeboten werden (analog zum App Store von Apple). Während im ersten Szenario den Konsumentinnen und Konsumenten das Vertrauen in die Sicherheit und Zuverlässigkeit der individuellen Apps fehlen dürfte, setzt das zweite Szenario eine erhebliche Marktmacht eines einzelnen Anbieterunternehmens voraus. Zwar ist beides nicht unmöglich, erheblich wahrscheinlicher erscheint jedoch ein Szenario, bei dem der Zugang zu einem oder mehreren App Stores jeweils durch ein Unternehmen oder durch ein Konglomerat mehrerer Unternehmen (z. B. Herstellerunternehmen von Servicerobotern) kontrolliert wird. Die dort angebotenen Apps wären dann mit einer Vielzahl von Servicerobotern kompatibel (analog zu Google Play). Dies setzt jedoch die Etablierung entsprechender Standards in einem der beiden oben skizzierten Szenarien voraus. Darin wird voraussichtlich auch eines der größten Hindernisse bei der Eroberung des Massenmarkts bestehen.

⁸ <https://robotop-konfigurator.de/>.

⁹ <https://roboport.io/>.

¹⁰ <https://seronet-projekt.de/>.

Auf den Betreiber, des App Stores für die Servicerobotik, kommen auf jeden Fall weitaus größere Anforderungen zu als bei den Smartphones. Die Prüfung der Apps von Dritten ist sehr viel anspruchsvoller, um auch deren funktionale Sicherheit zu gewährleisten. Noch stärker als bei den Smartphones wird damit der Betreiber des App Stores eine dominierende Rolle einnehmen. Seine Provision an den Verkäufen im Store muss so hoch sein, dass seine Prüfleistung refinanziert wird. Es ist zu erwarten, dass der Betreiber den Zugang für App-Anbieter zum Store restriktiver handhaben wird, als dies bei den Smartphones der Fall ist, um den Aufwand für seine Prüfleistung zu senken.

Eine auch nur einigermaßen fundierte quantitative Abschätzung des Marktpotenzials für ein Ökosystem der Servicerobotik ist angesichts der zahlreichen Unwägbarkeiten nicht möglich. Trotzdem ist durchaus denkbar, dass auch im Bereich der Servicerobotik für den Endanwender ähnliche Umsatzrelationen in den App Stores erreicht werden und damit ein profitables Ökosystem entstehen kann.

7 Fazit und Ausblick

Unsere Studie zeigt, dass das maßgebliche Wertschöpfungspotenzial in einem zukünftigen Massenmarkt der Servicerobotik bei den Herstellern der Serviceroboter liegt. In einem voll entwickelten Massenmarkt ist hierbei prinzipiell ein Umsatzpotenzial in Höhe von mehreren hundert Milliarden EUR möglich. Dies setzt jedoch voraus, dass es sich bei den Service-robotern um Anwendungen handelt, die echte Bedürfnisse von Konsumentinnen und Konsumenten adressieren und diese auch adäquat befriedigen können. Die beste Ausgangssituation haben in diesem Markt Unternehmen aus Branchen, die bereits heute durch das B2C-Geschäft mit komplexen elektronischen Produkten, die Serienfertigung großer Stückzahlen sowie durch einen intensiven Preiswettbewerb gekennzeichnet sind. Für Unternehmen anderer Branchen, die technologisch ebenfalls in der Lage wären, Serviceroboter herzustellen, sind die Markteintrittsbarrieren dagegen deutlich höher. Beispielsweise sind Automobilhersteller mit dem für sie neuen Robotik-Markt noch nicht vertraut. Entsprechende Entwicklungen sind aus ihren Reihen bisher nicht bekannt. Herstellerunternehmen von Industrierobotern kennen zwar die Technologie, müssten sich jedoch gänzlich neu auf das B2C-Geschäft mit tendenziell deutlich geringeren Margen und völlig anderen Anforderungen einlassen. Start-ups wiederum haben in der Regel die Fähigkeit ganz neue Lösungen zu entwickeln, da sie keiner Vorprägung einer bestimmten Branche unterliegen. Vor dem Hintergrund des äußerst hohen Investitionsaufwands stehen sie allerdings in Deutschland und Europa vor sehr hohen Hürden hinsichtlich der Höhe möglicher Finanzierungsrunden.

Die Potenziale auf Ebene der Komponenten für Herstellerunternehmen von E-Motoren, Sensoren und Greiftechnik sind dagegen im Vergleich deutlich geringer, allerdings aus volkswirtschaftlicher Sicht noch immer relevant. Eine Voraussetzung für den Erfolg deutscher Unternehmen ist dabei allerdings deren strikte Ausrichtung auf den zu erwartenden intensiven Preiswettbewerb. Für deutsche Spritzguss-Unternehmen könnten sich zudem Potenziale hinsichtlich der Belieferung europäischer Roboterhersteller ergeben, wobei sie durch Automatisierung und kurze Lieferzeiten die Kostenvorteile asiatischer Unternehmen wettmachen müssen.

Ob sich im Massenmarkt der Servicerobotik analog zum Smartphone-Markt ebenfalls ein Ökosystem für Anwendungssoftware (Apps) entwickeln wird, ist derzeit nicht verlässlich abzuschätzen, jedoch aus unserer Sicht durchaus möglich. Wegen der großen Komplexität sowie hoher Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit der Roboter ist hierbei davon auszugehen, dass die Hersteller, im Gegensatz zum Android-Ökosystem der Smartphones, eine bedeutendere Rolle einnehmen werden. Ein Versuch, das damit verbundene Marktpotenzial abzuschätzen, wurde in der vorliegenden Studie nicht unternommen, da die Unbekannten einer solchen Schätzgleichung zu zahlreich und die Ergebnisse entsprechend spekulativ wären. Es kann jedoch als wahrscheinlich gelten, dass die Entstehung solcher Ökosysteme die Bindung der Konsumentinnen und Konsumenten an deren Betreiber wesentlich stärken wird. Dies ist ein weiteres Argument für die deutsche Industrie, sich auch als Herstellerunternehmen von Servicerobotern in diesem entstehenden Markt zu engagieren.

Literatur

AMA (2018): Sensor Technologien 2022, AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V., Berlin.

App Annie (2017): Umsatz mit mobile Apps weltweit in den Jahren 2015 und 2016 sowie eine Prognose für 2017 und 2021 (in Milliarden US-Dollar). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/550222/umfrage/umsatz-mit-apps-weltweit/> [Zugriffsdatum: 20.07.2020].

App Annie (2020): The State of Mobile in 2020: The Key Stats You Need to Know, unter: www.appannie.com/en/insights/market-data/state-of-mobile-2020-infographic/ [Zugriffsdatum: 21.07.2020].

Avicenne Energy (2020): The rechargeable battery market 2019-2030, AVICENNE Développement; 28th Edition – V1; Paris.

Aspencore (2019): 2019 Embedded Markets Study, unter: www.embedded.com/2019-embedded-markets-study-reflects-emerging-technologies-continued-c-c-dominance/ [Zugriffsdatum: 15.10.2020].

BMW (2018): Thesen zur industriellen Batteriezellfertigung in Deutschland und Europa, unter: www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/thesen-zur-industriellen-batterie-zellfertigung-in-deutschland-und-europa.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [Zugriffsdatum: 21.07.2020].

Bosch (2020): Bosch und Gardena gründen Akku-Allianz (Manuel Roj) unter: www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/geld-platz-und-zeit-sparen-mit-einem-akku-fuer-viele-markten-215504.html [Zugriffsdatum: 21.07.2020].

Business Wire (2019): Absatz von Apple iPhones weltweit in den Geschäftsjahren 2007 bis 2019 (in Millionen Stück). www.statista.de/statistik/daten/studie/203584/umfrage/absatz-von-apple-iphones-seit-dem-geschaeftsjahr-2007/ [Zugriffsdatum: 22. Juni 2020].

BVK, IE.F, Roland Berger (2018): Treibstoff Venture Capital – Wie wir Innovation und Wachstum befeuern, Berlin, München.

Counterpoint Research (2020): Smartphone revenues worldwide from 2011 to 2019 (in billion U.S. dollars). www.statista.com/statistics/687476/global-smartphone-revenues/ [Zugriffsdatum: 21.07.2020].

Destatis (2020): Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige (WZ2008 2-/3-/4-Steller), unter www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=42111-0003&bypass=true&levelindex=1&levelid=1593095859403#abreadcrumb [Zugriffsdatum: 19.05.2020].

Dispan, J; Vassiliadis, Michael (2014): Kunststoffverarbeitung in Deutschland – Eine Branchenanalyse, Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie, Hannover.

Fraunhofer IPA, ISI (2011): Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung, Stuttgart.

Forbes (2017): BlackBerry's QNX Faces Significant Threats In The Auto Market, unter www.forbes.com/sites/greatspeculations/2017/05/24/blackberrys-qnx-faces-significant-threats-in-the-auto-market/#53ed63491313 [Zugriffsdatum: 09.10.2020].

Fresh Consulting (2020): Why Robotics Companies Fail, unter www.freshconsulting.com/wp-content/uploads/2020/06/Why-Robotics-Fail_Fresh-Consulting.pdf?utm_medium=email&_hsmi=89398002&_hsenc=p2ANqtz-8POh6suH7GGBkx8tq8bTr9BLDALnzVg-p83hWutGlpIYASzlyZgUA8CLXlzh2C2fCKF2mNIqWsl-HWPjN_tWQIE_jNwcA&utm_content=89398002&utm_source=hs_email, [Zugriffsdatum: 01. Oktober 2020].

gfu (2020): Absatz von Fernsehgeräten auf dem Konsumentenmarkt in Deutschland von 2005 bis 2019 (in Millionen Stück). www.statista.de/statistik/daten/studie/193702/umfrage/absatz-von-fernsehern-in-deutschland-seit-2005/ [Zugriffsdatum: 22. Juni 2020].

Handelsblatt (2016): Der Hype um den Thermomix hält an, unter www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand/vorwerk-steigert-umsatz-der-hype-um-den-thermomix-haelt-an/14831366.html [Zugriffsdatum: 19.05.2020].

IDC (2019): Prognose zum Absatz von intelligenten Lautsprechern weltweit von 2018 bis 2023 (in Millionen Stück). www.statista.de/statistik/daten/studie/1079997/umfrage/prognose-zum-absatz-von-intelligenten-lautsprechern-weltweit/ [Zugriffsdatum: 22. Juni 2020].

IFR (2019): World Robotics 2019 – Service Robots, VDMA Services, Frankfurt.

iiT (2013a): Industrielle Servicerobotik, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin.

iiT (2013b): Multimodale Sensorik – Konzepte der Umwelterkennung/-modellierung, Leitfaden für Hersteller und Anwender, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin.

Kovacic, Mateja (2018): The making of national robot history in Japan: monozukuri, enculturation, and cultural lineage of robots, in: *Critical Asian Studies*, 50(4), Routledge.

Panasonic (2019): Autonomous Mobility Robot for More Secure and Comfortable Life, unter <https://news.panasonic.com/global/stories/2019/69861.html> [Zugriffsdatum: 23.06.2020]

PlasticsEurope Deutschland e. V. (2019): Geschäftsbericht 2018. Frankfurt/Main.

Pluta, Werner (2018): Honda stellt den Asimo ein, unter www.golem.de/news/roboter-honda-stellt-den-asimo-ein-1806-135222.html, [Zugriffsdatum: 23.06.2020].

Statista (2020): Kühlschränke - weltweit. www.statista.de/outlook/16010100/100/kuehlschraenke/weltweit [Zugriffsdatum: 22. Juni 2020].

Stiftung Warentest (2019): Expedition unters Sofa, Test 2019 (3), S. 52-58.

t3n (2020): Automatisierung bei Apple: Roboter scheitern bei iPad-Produktion, unter www.t3n.de/news/automatisierung-apple-roboter-1287799/ [Zugriffsdatum: 08.07.2020].

techinsights (2019a): www.techinsights.com/blog/samsung-galaxy-s10-teardown [Zugriffsdatum: 08.07.2020].

techinsights (2019b): www.techinsights.com/blog/apple-iphone-11-pro-max-teardown [Zugriffsdatum: 08.07.2020]

The RobotReport (2018): Jibo social robot: where things went wrong, unter www.therobotreport.com/jibo-social-robot-analyzing-what-went-wrong/ [Zugriffsdatum: 20.10.2020].

Thielmann et al. (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf, Fraunhofer ISI.

Tiedemann, Yannick (2019): BMW plant Verkauf von smarten Logistik-Robotern, unter www.automotiveit.eu/produktion/bmw-plant-verkauf-von-smarten-logistik-robotern-275.html [Zugriffsdatum: 23.06.2020].

Toyota (2013): www.toyota-media.de/blog/technik/artikel/mission-weltall [Zugriffsdatum: 30.10.2020].

Toyota (2017): www.toyota-media.de/blog/unternehmen/artikel/toyota-roboter-kirobo-mini-jetzt-in-ganz-japan-erhaltlich [Zugriffsdatum: 30.10.2020].

Wadhvani, Preeti; Saha, Prasenjit (2019): Robot End-Effector Market Size, By Product (Welding Guns, Grippers, Tool Changers, Suction Cups), By Application (Material Handling, Assembly, Welding, Painting), By End-Use (Automotive, Metals & Machinery, Plastics, Food & Beverage, Electrical & Electronics), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Growth Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2019 – 2025; unter www.gminsights.com/industry-analysis/robot-end-effector-market [Zugriffsdatum: 25.06.2020].

