

Studie „Autonome Systeme“

Roman Dumitrescu, Jürgen Gausemeier, Philipp Slusallek
Sarah Cieslik, Georg Demme, Tommy Falkowski, Hilko Hoffmann,
Susanne Kadner, Felix Reinhart, Thorsten Westermann, Johannes Winter

Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 13-2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (e.V.)
Karolinenplatz 4, 80333 München

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) GmbH
Trippstadter Straße 122, 67663 Kaiserslautern

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM
Zukunftsmeile 1, 33102 Paderborn

Februar 2018

Diese Studie wurde im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) erstellt. Die Ergebnisse und Interpretationen liegen in der alleinigen Verantwortung der durchführenden Institute. Die EFI hat auf die Abfassung des Berichts keinen Einfluss genommen.

Studien zum deutschen Innovationssystem
Nr. 13-2018
ISSN 1613-4338

Herausgeber: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)
Geschäftsstelle, c/o Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, Pariser Platz 6, 10117 Berlin

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie die Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung der EFI oder der Institute reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Projektteam:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Prof. Jürgen Gausemeier, Dr. Susanne Kadner, Dr. Johannes Winter

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI)
Prof. Philipp Slusallek, Sarah Cieslik, Georg Demme, Dr. Hilko Hoffmann

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM
Prof. Roman Dumitrescu, Tommy Falkowski, Dr. Felix Reinhart, Thorsten Westermann

Kontakt und weitere Informationen:

Dr. Johannes Winter
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
Tel: +49 89 5 20 30 9-14
Fax: +49 89 5 20 30 9-9
E-Mail: winter@acatech.de

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung/ Executive Summary	7
1	Einleitung	8
1.1	Eigenschaften und Einsatzgebiete autonomer Systeme	9
1.2	Elemente autonomer Systeme	12
1.2.1	Kerntechnologien	13
1.2.2	Umgebungstechnologien	14
1.2.3	Querschnittsthemen	15
1.3	Anwendungsfelder für autonome Systeme	19
1.3.1	Mobilität.....	19
1.3.2	Industrielle Produktion.....	22
1.3.3	Smart Home	23
1.3.4	Menschenfeindliche Umgebungen	23
1.3.5	Gesundheit.....	24
1.3.6	Energie.....	25
1.3.7	Landwirtschaft.....	25
1.3.8	Weitere Anwendungsfelder	26
2	Aktueller Entwicklungsstand	27
2.1	Branchen und Kooperationen	27
2.2	Trends	30
2.3	Forschungsfelder	32
2.4	Öffentliche Förderung.....	33
2.5	Testfelder und Teststrecken	40
2.6	Regulierungsaktivitäten.....	40
2.6.1	USA.....	40
2.6.2	Japan.....	42
2.6.3	Israel.....	43
2.6.4	China.....	43
2.6.5	Südkorea.....	44
2.6.6	Deutschland.....	45
2.6.7	Europäische Union.....	46

3	Stärken und Schwächen des deutschen Wissenschafts- und Innovations-standorts	48
3.1	Ergebnisse der Expertenbefragung.....	48
3.1.1	Relevanz autonomer Systemen für die einzelnen Anwendungsbereiche.....	49
3.1.2	Entwicklungsstand autonomer Systeme	51
3.1.3	Nutzenpotenziale autonomer Systeme	53
3.1.4	Herausforderungen bei der Entwicklung autonomer Systeme.....	54
3.1.5	Entwicklungsbedarf in Technologiebereichen.....	55
3.1.6	Entwicklungsstand der Technologiebereiche in Deutschland im internationalen Vergleich	56
3.1.7	Entwicklungsstand von Querschnittsthemen.....	60
3.1.8	Entwicklungsstand in Deutschland im Vergleich zu ausgewählten Nationen.....	61
3.1.9	Forschungsförderung und Regulierung.....	62
3.2	SWOT Analyse	63
4	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	66
4.1	Weitere relevante Anwendungsbereiche für autonome Systeme fördern.....	66
4.3	Anforderungen und Konzepte zum Zusammenspiel von Mensch und autonomen Systemen erforschen.....	68
4.4	Forschung zur Interaktion autonomer Systeme mit niedriger automatisierten Systemen sowie dem daraus resultierenden Mischbetrieb initiieren	69
4.5	Forschung zur Interaktion verschiedener autonomer Systeme miteinander sowie mit der Infrastruktur stärken	69
4.6	Forschung zum Umgang mit maschinellem Lernen und zu der standardisierten Weitergabe des so erzeugten Wissens initiieren	71
4.7	Forschungsanstrengungen zu Simulation, Zertifizierung und Verifikation stärken	71
4.8	Lücken in der Förderung der Cyber-Security schließen	72
4.9	Geeignete Förderkonzepte entwickeln.....	73
4.10	Impulse für KI-Forschungsplattform(en) setzen.....	73
4.11	Fragen zu rechtlichen und ethischen Rahmenbedingungen frühzeitig adressieren	74
4.12	Gesellschaftliche Aspekte frühzeitig adressieren	75
4.13	Neue Geschäftsmodelle und internationale Abhängigkeiten identifizieren.....	76
4.14	Weiterführung der Evaluation	77
	Literaturliste	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Entwicklungsstufen automatisierter Systeme am Beispiel des autonomen Fahrens	11
Abbildung 2	Elemente autonomer Systeme	12
Abbildung 3	Anwendungsgebiete für Autonome Systeme	20
Abbildung 4	Zuordnung der gefundenen Projekte zu Themenfeldern.....	36
Abbildung 5	Projektstarts EU und Deutschland	37
Abbildung 6	Projektvolumen EU-Projekte nach Startjahren	38
Abbildung 7	Projektvolumen deutscher Projekte nach Startjahren	38
Abbildung 8	Anteil autonomes Fahren am Projektvolumen der EU-Projekte 2012 bis 2017	39
Abbildung 9	Anteil autonomes Fahren am Projektvolumen deutscher Projekte 2012 bis 2017.	39
Abbildung 10	Organisationsart und Rolle der befragten Experten	49
Abbildung 11	Anwendungsbereiche der befragten Organisationen	49
Abbildung 12	Relevanz autonomer Systeme für einzelne Anwendungsfelder.....	50
Abbildung 13	Aktueller maximaler Entwicklungsstand technischer Systeme in verschiedenen Anwendungsbereichen.....	52
Abbildung 14	Einschätzung des Zeitraums bis zur Verfügbarkeit von autonomen Systemen in den einzelnen Anwendungsbereichen	52
Abbildung 15	Rangfolge der Nutzenpotenziale autonomer Systeme	53
Abbildung 16	Herausforderungen bei der Entwicklung von autonomen Systemen	55
Abbildung 17	Rangfolge des Entwicklungsbedarfs in den Technologiebereichen autonomer Systeme.....	56
Abbildung 18	Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Wahrnehmen“	57
Abbildung 19	Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Lernen“	57
Abbildung 20	Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Handeln“.....	58
Abbildung 21	Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Selbstregulierung“	59
Abbildung 22	Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Umgebungstechnologien“	59
Abbildung 23	Internationaler und nationaler Entwicklungsstand in Querschnittsthemen.....	60
Abbildung 24	Entwicklungsstand von ausgewählten Ländern im Bereich autonome Systeme im Vergleich zu Deutschland.....	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Auswahl typischer Kooperationen (ohne militärische Komponenten und Anwendungen)	28
Tabelle 2	Überblick über die öffentliche Förderung	34
Tabelle 3	SWOT Analyse des Forschungs- und Innovationsstandorts Deutschland im Kontext autonome Systeme	64

0 Kurzfassung/ Executive Summary

Autonome Systeme bringen durch ihre besonderen Eigenschaften grundlegende Veränderungen für Wirtschaft und Gesellschaft mit sich. Sie können dazu beitragen, Produktionsprozesse, Mobilitäts- und Logistiksysteme besser auf den Menschen abzustimmen sowie flexibler und ressourcenschonender zu gestalten. Autonome Smart Homes bzw. Smart Buildings werden im Zusammenspiel mit intelligenten, autonomen Energienetzen eine sehr große Rolle bei der Steigerung der Energieeffizienz haben. Aber auch in anderen Bereichen wie dem Gesundheitssektor sowie in menschenfeindlichen Umgebungen eröffnen sich große Nutzenpotenziale für den Einsatz autonomer Systeme. Ausgehend von den anerkannt großen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Potenzialen, die autonome Systeme für den deutschen Industrie-, Wissenschafts- und Innovationsstandort haben, ist es Aufgabe dieser Studie, eine erste Bestandsaufnahme zu Deutschlands internationaler Position bei den grundlegenden technologischen Komponenten autonomer Systeme sowie in den Anwendungsfeldern Mobilität, industrielle Produktion, Smart Home, menschenfeindliche Umgebungen, Gesundheit, Energie und Landwirtschaft herauszuarbeiten.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Forschungs- und Technologiefeldanalyse vorgestellt, die sich an den wichtigsten technologischen Komponenten und aktuellen bzw. absehbaren Anwendungsgebieten autonomer Systeme orientiert. Darüber hinaus werden für einen sinnvollen und sicheren Einsatz notwendige Querschnittsthemen sowie Anforderungen an Regulierungen und Standards adressiert. Basierend auf den Ergebnissen einer Recherche in Themenportalen und Förderdatenbanken, einer Online-Umfrage, mehreren Experteninterviews sowie eines zusammenfassenden Expertenworkshops wurde eine erste Beurteilung der Position Deutschlands in den wichtigsten Technologiefeldern vorgenommen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass das autonome Fahren, die Robotik sowie die Logistik die Haupttreiber für autonome Systeme sind und dass eine weltweite Spezialisierung der führenden Unternehmen auf einzelne Komponenten autonomer Systeme stattfindet. Gleichzeitig wird deutlich, dass wichtige Aspekte wie beispielsweise Haftungsfragen aber auch ethische Rahmenbedingungen noch nicht umfassend geklärt sind.

Mit Hilfe einer SWOT-Analyse werden die Stärken und Schwächen des deutschen Wissenschafts- und Innovationsstandorts bezogen auf die identifizierten Technologien und Anwendungen eingeordnet. Als Stärke wird die teils sehr ausgereifte Technologiebasis sowie der etablierte Wissens- und Technologietransfer zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen hervorgehoben. Als weitere Stärke fällt eine hohe Investitionsbereitschaft durch die öffentlichen Fördergeber für einzelne Anwendungsbereiche auf, welche aber durch ihre Fokussierung auf einzelne Anwendungsbereiche und Technologieschwerpunkte als Schwäche gewertet werden kann. Insgesamt unterstreicht die SWOT-Analyse, dass sich Deutschland im internationalen Vergleich in einer guten Ausgangsposition befindet, sich erhebliche Chancen für eine weitere Profilierung bieten und die Risiken zu bewältigen sind.

Abschließend werden im Rahmen einer Zusammenfassung Handlungsempfehlungen zu relevanten Fragestellungen wie der strategischen Forschungsförderung und verbleibenden technischen Herausforderungen, die mit der Einführung autonomer Systeme, dem Umgang mit maschinellem Lernen, dem Zusammenspiel autonomer Systeme und der umgebenden Infrastruktur sowie der

Interaktion mit dem Menschen verbunden sind, vorgestellt. Es wird deutlich, dass autonome Systeme auf dem engen Zusammenspiel von vielen Fachdisziplinen und Technologien beruhen und die damit einhergehende Komplexität der Innovationsanforderungen besonders ausgeprägte Kompetenzen im Bereich Systementwurf und -integration auf der Grundlage der Systemtheorie/Systemtechnik erfordern. Weitere Handlungsempfehlungen adressieren wichtige Querschnittsthemen wie Prüfverfahren, die IT-Sicherheit, ethische und rechtliche Rahmenbedingungen, gesellschaftliche Aspekte sowie neue Services und Geschäftsmodelle.

1 Einleitung

Entwicklungen rund um das “autonome Fahren” haben in der letzten Zeit viel öffentliche Aufmerksamkeit erfahren und auch der selbstständig agierende „Kollege Roboter“ ist fester Bestandteil der gesellschaftlichen Diskussion zur Zukunft der Arbeit. Die dazu fast wöchentlich erscheinenden Medienbeiträge¹ lassen demzufolge den Eindruck entstehen, die Einführung autonomer Systeme stünde unmittelbar bevor. Obwohl die meisten auf ihre ersten autonomen Fahrerlebnisse allerdings noch einige Jahre warten müssen, sind sich viele Experten bereits zum jetzigen Zeitpunkt einig, dass der Einsatz autonomer Systeme aufgrund seines disruptiven Potenzials einer technologischen Revolution gleichkommen wird. Denn die damit verbundenen Veränderungen werden nicht allein im Straßenverkehr oder in der Fabrikhalle stattfinden, sondern auch in vielen anderen Lebensbereichen wird man autonomen Systemen in Form von Pflegerobotern, intelligenten Softwaresystemen zur Analyse medizinischer Daten oder smarten Energiesparfunktionen im eigenen Zuhause begegnen können. Ein zentrales Merkmal für die Autonomie des Systems ist dabei seine Fähigkeit, Aufgaben ohne Eingreifen des Menschen selbstständig und an die Situation angepasst durchführen zu können.

Selbst wenn das Thema “autonome Systeme” noch sehr neu erscheint, werden die beteiligten Einzeltechnologien bereits seit längerer Zeit und weitgehend unabhängig voneinander erforscht und eingesetzt. Die nun erreichten technologischen Fortschritte vor allem in den Bereichen Vernetzung und Cloud-Computing, Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen, sowie Sensortechnologien für die Umgebungserfassung in Echtzeit, lassen die Vision von autonomen Fahrzeugen und Systemen in absehbarer Zeit als realisierbar erscheinen und führen nun erstmals zu einer gesamthaften technologischen Betrachtung der nötigen Einzeltechnologien unter dem Oberbegriff “autonome Systeme”.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen bildet die vorliegende Studie den Entwicklungsstand der relevantesten Technologien in den wichtigsten Anwendungsfeldern autonomer Systeme ab und formuliert mit Blick auf den internationalen Vergleich mögliche Handlungsempfehlungen für den deutschen Wissenschafts- und Innovationsstandort. Basis der Studie bildet eine umfassende Forschungs- und Technologiefeldanalyse autonomer Systeme sowie eine Bestandsaufnahme deutscher und internationaler Förderpolitik- und Regulierungsaktivitäten. Eine auf Experteninterviews basierende SWOT-Analyse bildet die Basis für die Ableitung der Handlungsempfehlungen, die bei der Beurteilung der zukünftigen, internationalen Marktchancen und der Wett-

¹ Vgl Hagerty 2015; Gibbs 2016; Delius 2016; Hawkins 2016; FAZ 2016; Rietz 2017; Neumann 2017.

bewerbsfähigkeit unterstützen und Impulse für weitere Förder-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen geben sollen.

1.1 Eigenschaften und Einsatzgebiete autonomer Systeme

Autonome Systeme sind in der Lage, die ihnen übertragenen Aufgaben selbstständig und weitgehend ohne menschliche Eingriffe ausführen zu können. Es sind technisch äußerst komplexe Systeme, die sich von den heute weitverbreiteten automatisierten Systemen durch ihre hohe Anpassungsfähigkeit unterscheiden. Dazu zählen neben Robotern auch Fahrzeuge, Produktionsanlagen, Gebäude und Softwaresysteme.

Die Entwicklungsstufen automatisierter Systeme unterscheiden sich primär durch die Häufigkeit der notwendigen Eingriffe und Entscheidungen durch den Menschen. Das Spektrum reicht dabei von ferngesteuerten Systemen, bei denen der Mensch alle Entscheidungen trifft, bis hin zu voll autonomen Systemen, die auch über lange Zeiträume die Selbstregulation, d.h. die selbstständige Aufgabenerfüllung und Anpassung an wechselnde Umgebungen und Situationen, aufrechterhalten können. Eine wesentliche Eigenschaft für die Selbstregulationsfähigkeiten teil- oder vollautonomer Systeme ist die Fähigkeit zu lernen und aus gelerntem Wissen eine situationsangepasste Entscheidung zu treffen, abzuleiten und entsprechende Handlungen auszuführen. Folgende Automatisierungsgrade können unterschieden werden:

- **Keine Automation, ferngesteuerte Systeme:** Der Mensch steuert und überwacht alle Vorgänge selbst. Schalt- und Regelungsvorgänge werden von Nutzern oder geschlossenen Steuerungskomponenten ausgeführt.
- **Programmierte Systeme mit Assistenzfunktion:** Vorgegebene, programmierte Handlungsabläufe werden selbständig, ausgelöst z.B. durch Signale oder erreichte Schwellwerte, ausgeführt. Die Abläufe sind vorhersehbar und es gibt keine intelligente Anpassung an unvorhergesehene Situationen. Situationen, die nicht programmiert wurden, können nicht bzw. nur mit einer Notfallhandlung, wie z.B. Warnsignale, kompletter Stopp oder Einnehmen einer definierten Ruheposition behandelt werden. Mit automatisierten Systemen sind durchaus vielfältige und scheinbar intelligente Verhaltensmuster realisierbar, die über sehr lange Zeiträume aufrechterhalten werden können. Der Aufwand und die Systemkomplexität steigen jedoch mit zunehmender Handlungsvielfalt immens an, weil jeder Ablauf zuvor detailliert geplant und dann gezielt programmiert werden muss. Der Mensch muss bei nicht programmierten Situationen regelmäßig eingreifen.
- **Teilautomatisierte Systeme:** Ein Zwischenschritt zu selbstlernenden Systemen sind lernende Systeme. Um den Aufwand bei der Programmierung der Handlungen zu reduzieren, werden beispielsweise in der Teach-in-Roboterprogrammierung Ansätze verwendet, die dem Roboter Verhaltensmuster beibringen, indem man Bewegungsabläufe, Greifvorgänge etc. in einer Lernphase vormacht. Dieser automatische oder semiautomatische Aufbau einer Wissensbasis durch Training des Systems erfolgt vor der Inbetriebnahme. Handlungsmuster sowie die Erkennung von Situationen richten sich nach dem zuvor gelernten Wissen. Situationen außerhalb des gelernten Wissens können nicht bzw. nur

durch einen allgemeinen Notfallablauf behandelt werden. In solchen unbekanntem Situationen muss daher der Mensch stets eingreifen.

- **Hochautomatisierte, teilautonome Systeme:** Teilautonome Systeme verfügen über eine Selbstlernfunktionalität und erweitern ihre Wissensbasis auch im Betrieb fortlaufend. Die realisierbaren, autonom ausgeführten Handlungsvarianten beschränken sich in vielen Fällen auf spezifische Umfelder und/oder Aufgaben. Da stets neu hinzugelernt wird, kann die Selbstregulation in dem vorgesehenen, spezifischen Umfeld länger aufrechterhalten werden. Eine Kontrollabgabe an den Menschen kommt auch im spezifischen Umfeld häufiger vor. Außerhalb des spezifizierten Umfelds muss der Mensch die Kontrolle dauerhaft übernehmen. Teilautonome Systeme sind in einigen Anwendungsgebieten für autonome Systeme erreicht und werden als eine Übergangstechnik zu vollautonomen Systemen angesehen.
- **Vollständig selbstregulierende, autonome Systeme:** Diese Systeme sind ebenfalls selbstlernend und erreichen ein vorgegebenes Ziel weitestgehend ohne menschliche Eingriffe und ohne detaillierte Programmierung selbstständig und situationsadaptiv. Auch bei zunächst unbekanntem Situationen kommt eine Kontrollabgabe an den Menschen nur noch sehr selten vor. Das konkrete Systemverhalten ist nicht bzw. nur sehr eingeschränkt vorhersehbar. Das gelernte Wissen und die gewählten Lösungswege können sich auch bei technisch baugleichen Systemen erheblich unterscheiden. Diese Systeme sind vollautonom.

Systeme mit Assistenzfunktion, die vom Menschen bewusst aktiviert und übersteuert werden können, sind in allen Anwendungsfeldern bereits heute verbreitet. Auch weitergehend automatisierte Systeme stehen wiederum in unterschiedlichen Automatisierungsstufen zur Verfügung. Die Übergänge sind dabei fließend und von konkreten Systemen und Einsatzszenarien abhängig. Im folgenden Text werden die Fähigkeiten des Selbstlernens und der Selbstregulation als Unterscheidungsmerkmale verwendet. Die meisten heutigen Systeme sind Systeme mit Assistenzfunktion oder teilautomatisierte Systeme und noch **nicht** selbstlernend. Die derzeitigen Entwicklungen vor allem im Bereich des autonomen Fahrens (Abbildung 1) zielen auf teilautonome Systeme, die in bestimmten Umgebungen oder Situationen über einen längeren Zeitraum hinweg die Selbstregulation aufrechterhalten können. Sie sind selbstlernend bezogen auf diese konkreten Umgebungen und Situation. Vollständig autonome Systeme, die über einen langen Zeitraum ohne menschliche Eingriffe die Selbstregulation aufrechterhalten können, sind derzeit noch nicht umgesetzt.

Die Einsatzbereiche für autonome Systeme sind vielfältig und schließen neben der Produktion und dem Mobilitätsbereich das direkte Wohnumfeld (Smart Home), Zweckgebäude (Smart Building), den Energie-, Landwirtschafts- und Gesundheitssektor sowie viele weitere Anwendungsfelder wie menschenfeindliche Umgebungen mit ein. Gerade im Mobilitätsbereich existiert eine Vielzahl an Gründen für den Einsatz autonomer Fahrzeuge, denn sie können dazu beitragen, den Personen und Güterverkehr sicherer, effizienter, kostengünstiger, umwelt- und klimaschonender zu gestalten. In der Produktion kann die Einführung autonomer Systeme dazu beitragen, Arbeits-

und Produktionsprozesse besser an die Kundenbedarfe und die Arbeitsperson abzustimmen sowie flexibler und ressourcenschonender durchzuführen².

Der Technologiebereich autonome Systeme wird für den deutschen Industrie-, Wissenschafts- und Innovationsstandort große Nutzenpotentiale eröffnen. Dafür gilt es insbesondere die vorhandenen Potenziale in den Bereichen Industrie 4.0, Automation, Sensorsysteme und Umfelderkennung, Mechatronik, virtuelle Techniken und Künstliche Intelligenz auszuschöpfen, um im internationalen Wettbewerb als Technologieführer und Leitmarkt für autonome Systeme erfolgreich zu sein. Von besonderer Bedeutung für die zuverlässige Funktionsfähigkeit und die Akzeptanz sind das Maschinelle Lernen, die situationsgerechte Interaktion und Kollaboration zwischen Mensch und autonomen Systemen, virtuelle Verfahren für den Aufbau von Wissensbasen sowie die Simulation und Verifikation des Systemverhaltens.

Der Einsatz autonomer Systeme eröffnet die Möglichkeit, zahlreiche gesellschaftliche und wirtschaftliche Herausforderungen zu bewältigen. Gleichzeitig ist der Blick aber auch auf die entstehenden Risiken zu lenken, die einen breit angelegten gesellschaftlichen Dialog sowohl über die Chancen, als auch die Grenzen und Gefahren autonomer Systeme erforderlich machen. Rechtliche und ethische Fragestellungen rund um das Verhalten und die Entscheidungsfreiräume für autonome Systeme sind zufriedenstellend für die Gesellschaft zu beantworten. Neben den technologischen Fragen sollten auch in diesen Bereichen Standards entwickelt werden, die weltweite Anerkennung und Anwendung finden.

Abbildung 1 Entwicklungsstufen automatisierter Systeme am Beispiel des autonomen Fahrens



Bildquellen: BMW, Daimler, Hyundai, Tesla

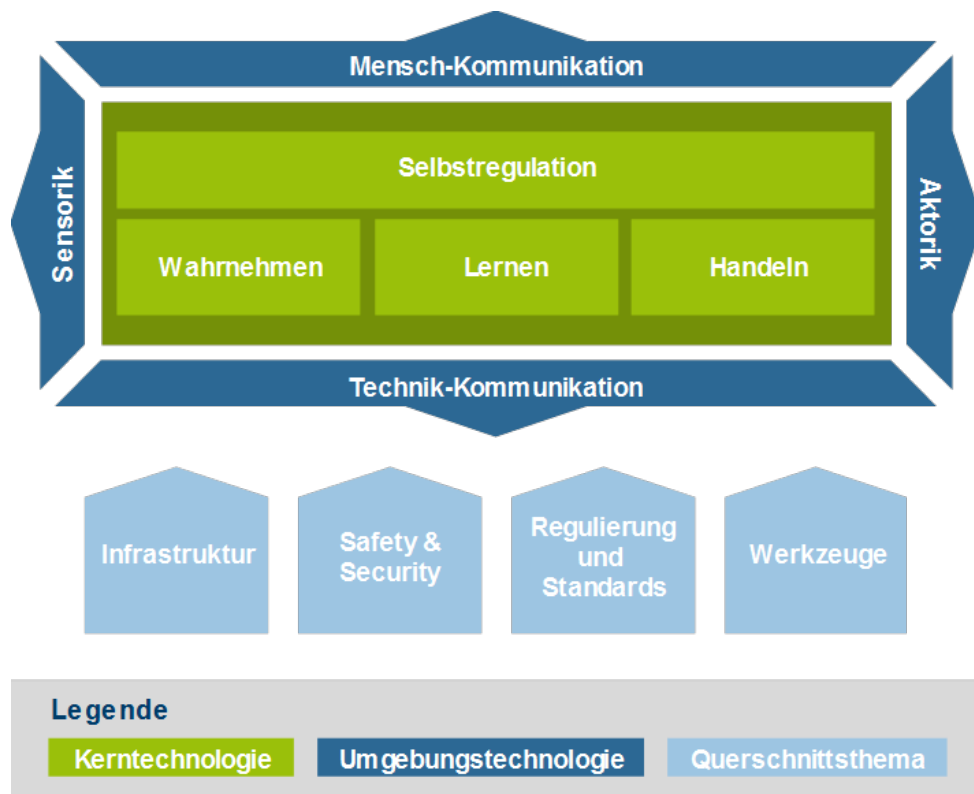
(Quelle: acatech, DFKI, IEM)

² Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

1.2 Elemente autonomer Systeme

Autonome Systeme sind komplexe Systeme mit zahlreichen Hard- und Software-Komponenten. Für die Begriffsdefinition und die Eingrenzung technologischer Komponenten bezieht sich die vorliegende Studie auf die im Rahmen des Fachforums Autonome Systeme erarbeitete Formulierung. Diese bezeichnet ein System erst dann als autonom, „wenn es ohne menschliche Steuerung und ohne detaillierte Programmierung ein vorgegebenes Ziel selbstständig und an die Situation angepasst erreichen kann. Das System ist fähig, die Umgebung z.B. über Sensoren wahrzunehmen, proaktiv und situationsgerecht einen angemessenen Handlungsplan zu generieren und diesen sicher und zuverlässig auszuführen.“³ Abbildung 2 zeigt die wesentlichen Elemente autonomer Systeme.

Abbildung 2 Elemente autonomer Systeme



(Quelle: acatech, DFKI, IEM)

³ Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

1.2.1 Kerntechnologien

Selbstregulation: Die Selbstregulation ist die Grundvoraussetzung für ein funktionierendes, autonomes System. Zur Aufrechterhaltung der Selbstregulation müssen autonome Systeme stetig hinzulernen, fehlertolerant und vorausschauend sein. Somit können vollständig autonome Systeme (siehe Abschnitt 1.1) auch mit Situationen sinnvoll umgehen, die von Unsicherheit, Vagheit, Unvollständigkeit und Ressourcenbeschränktheit geprägt sind. Die Selbstregulation umfasst die Fähigkeit, sich an neue, unbekannte Situationen anzupassen, aus zuvor gelerntem Wissen selbstständig Schlüsse zu ziehen und diese in entsprechend adaptierte Handlungsmuster bzw. Handlungspläne umzusetzen. Wesentliche Komponenten sind dabei der Selbstschutz, die Selbsterhaltung sowie die Selbstheilung. Kern der Selbstregulation ist das stetige Lernen aus erfolgreichen oder misslungenen Handlungen. Basierend auf dem Gelernten kann eine Selbstoptimierung erfolgen, die eine autonome Anpassung von Systemzielen und -verhalten ermöglicht.

Wahrnehmen: Für ein sinnvolles Systemverhalten müssen autonome Systeme umfassendes Wissen von ihrem jeweiligen Umfeld haben. Die Umfelderkennung muss dabei möglichst in Echtzeit geschehen. Je nach Aufgabengebiet werden verschiedenste Sensoren eingesetzt, um die nötigen Informationen zu erhalten. In vielen Fällen werden Informationen verschiedener Sensoren zusammengeführt (Sensorfusion), um eine sichere Erfassung aller Objekte zu ermöglichen. Ein weiterer Teil der Wahrnehmung ist die Datenanalyse und Mustererkennung, die es dem autonomen System ermöglichen, Objekte im Umfeld zu identifizieren. Hierzu werden verschiedene Verfahren, die teilweise auf die jeweilige Sensorik spezialisiert sind (z.B. Computer Vision, Spracherkennung, etc.) eingesetzt.

Lernen, Planen und Schlussfolgern: Unter maschinellem Lernen werden Algorithmen verstanden, die es einem Computer ermöglichen, anhand vorgegebener Entscheidungs- und Bewertungsprobleme Strukturen aus Daten zu erfassen und später auf einen gleichen oder hinreichend ähnlichen Anwendungsfall anzuwenden. Das Lernen kann vollständig autonom, unüberwacht oder mit entsprechender Datenaufbereitung überwacht erfolgen. Deep Learning bezeichnet eine Gruppe von maschinellen Lernverfahren, die häufig mit dem maschinellen Lernen gleichgesetzt wird. Deep Learning eignet sich für komplexe Erkennungs- und Entscheidungsprobleme, erfordert jedoch eine sehr große Menge an aussagekräftigen Daten und Situationen, um das System hinreichend zu trainieren, möglichst alle auftretenden Situationen erkennen zu können. Die möglichst automatisierte Erstellung solcher Trainingsdaten z.B. mithilfe von Simulationsverfahren (Verhaltenssimulation, Fahrsimulation, Physiksimulation, etc.) ist ein aktueller Forschungsgegenstand im Kontext autonomer Systeme.

Die Handlungsplanung befasst sich mit der automatischen Auswahl zielgerichteter Aktionen in autonomen Systemen. Dabei werden die nötigen Handlungsschritte geplant, um ein meist vorgegebenes Ziel zu erreichen. Der Ansatz ist modellbasiert, d.h. das System verfügt aus Umfelderkennung, Datenanalyse und Wissensdatenbasis über eine formale Beschreibung des derzeitigen Weltzustandes, der verfügbaren Aktionen, einer Zielbedingung, sowie ggf. Randbedingungen. Anhand des Modells simuliert der Planungsalgorithmus die möglichen Entwicklungen und findet eine geeignete Handlungsstrategie.

Die Planerkennung ist dagegen der Versuch, beobachtete Handlungen bzw. Situationen mit übergeordneten Plänen zu erklären. Bei der Planerkennung geht es also darum, aus den beobachteten Aktionen eines handelnden Agenten mithilfe einer Planbibliothek auf dessen Ziele bzw. Pläne zu schließen und Folgeaktionen vorherzusagen. Die erkannten Pläne sowie die Intentionen und Ziele des Agenten bilden die Grundlage für eine der aktuellen Situation angemessenen Unterstützung durch ein intelligentes System. Bei Planerkennung handelt es sich um die umgekehrte Problemstellung der Handlungsplanung. Während bei der Handlungsplanung ein Ziel vorgegeben wird, zu dem eine Folge von Handlungsaktionen gefunden werden muss, geht es bei der Planerkennung um die Erkennung eines Handlungsziels aus beobachteten Aktionen. Die Planerkennung kann auch als Teil des maschinellen Lernens verstanden werden. Dabei werden einzelne Beobachtungen mit abstrakten, aus vorherigen Situationen abgeleiteten Konzeptbeschreibungen verglichen.

Neben den eigentlichen Verfahren und deren Abarbeitung in naher Echtzeit spielt für autonome Systeme die Vergleichbarkeit von gelerntem Wissen und darauf aufbauenden Handlungen eine sehr große Rolle. Ein sinnvolles, nachvollziehbares, verlässliches Systemverhalten, z.B. von Fahrzeugen im Straßenverkehr, ist essentiell. Ebenso sind zuverlässige Notfallszenarien wichtig, um bei unbekanntem Situationen, bzw. Situationen, für die kein geeigneter Handlungsplan gefunden werden kann, angemessen und nachvollziehbar zu reagieren.

Handeln: Der zuvor gefundene Handlungsplan muss in adäquate Handlungen umgesetzt werden. Je nach autonomem System können das Objektmanipulationen, wie z.B. Greifen, Werfen, Schieben, Türöffnen, oder Werkzeugbenutzung, wie auch Bewegungsgenerierung, d.h. Laufen, Fahren, Manövrieren, etc. sein. Autonome Software-Systeme setzen ihre Aktionen in entsprechende Software-Kommandos um.

1.2.2 Umgebungstechnologien

Die Umgebungstechnologien umfassen eine, oft redundant ausgelegte, Sensorik, eine latenzarme und sichere Vernetzung für die Kommunikation mit der Außenwelt⁴, entsprechende Methoden für die Kommunikation des Menschen mit autonomen Systemen sowie eine anwendungsspezifische Aktorik zur Umsetzung der geplanten Handlungen. Umgebungstechnologien sorgen daher für die notwendigen Informationen und setzen die zuvor geplanten Handlungen um.

Sensorik dient zur Zustandsanalyse der relevanten Umgebung. Hierfür werden vielfältige Sensortechnologien eingesetzt, deren Auslegung sich nach Einsatzzweck und erwarteten Umgebungsbedingungen richtet. Die möglichst schnelle und präzise Wahrnehmung der Umgebung und der darin befindlichen Objekte ist ein Schlüsselthema bei der Umsetzung beweglicher, zuverlässiger und vor allem sicherer autonomer Systeme. Wesentliche Herausforderungen sind neben völlig neuen Sensoren für neue Anwendungsfelder, die Sensorgröße, die Erfassungsgeschwindigkeit und die Messgenauigkeit. Auch die Kombination verschiedener Sensoren, die Sensorfusion, ist nach wie vor Gegenstand von Entwicklungsanstrengungen. Die Notwendigkeit,

⁴ Vgl. Wahlster/ Kirchner 2015; Hägele et al. 2015

auch an Bord beweglicher autonomer Systeme eine adäquate Rechenleistung, z.B. für maschinelles Lernen, die Planerkennung und die Handlungsplanung, zur Verfügung zu haben, erfordert umfassende Entwicklungsanstrengungen.

Aktorik ermöglicht die Ausführung der zuvor erstellten Handlungspläne und sorgt für eine Zielerreichung durch entsprechende Transformation des Umgebungszustands. Die für die Durchführung von Aktionen und Bewegungen nötige Aktorik und Regelung kann auf umfangreiche, weit fortgeschrittenen Lösungen aus den Bereichen Automationstechnik, Robotik, Anlagenbau und Steuerungstechnik zurückgreifen.

Technik-Kommunikation umfasst die Vernetzung aller notwendigen technischen Komponenten untereinander sowie mit der notwendigen Infrastruktur. Autonome Systeme brauchen für zahlreiche Anwendungsszenarien Informationen von anderen automatisierten Systemen. Beim (gewünschten) Zusammenspiel verschiedener autonomer Systeme, müssen diese sich nach dem Vorbild der menschlichen Kommunikation ihre Absichten und Handlungspläne mitteilen und gegebenenfalls gemeinsam (im Schwarm) handeln. Hierfür sind entsprechende, standardisierte, systemübergreifende Kommunikationsmechanismen notwendig, die bisher nur in Einzellösungen realisiert sind.

Mensch-Kommunikation ermöglicht dem autonomen System erfolgte bzw. geplante Handlungen den Nutzern mitzuteilen sowie bei Situationen, die nicht selbstständig gemeistert werden können, die Kontrolle an den Nutzer oder die Nutzerin abzugeben. Autonome Systeme sollen den Menschen bei verschiedensten Tätigkeiten entlasten, indem sie Aufgaben selbstständig übernehmen. Abhängig von Einsatzzweck und Umfeld ist die Kontrollabgabe vom autonomen System zum Menschen und umgekehrt notwendig. Zudem muss ein autonomes System seiner Umwelt mitteilen können, was als nächstes getan wird, bzw. das Systemverhalten muss an Handlungs- und Erwartungsmuster der jeweiligen Nutzer angepasst werden. Hierfür sind neue Interaktionsformen nötig, die Gegenstand intensiver Forschung und auch der sich anschließenden Standardisierung sind.

1.2.3 Querschnittsthemen

Damit autonome Systeme sinnvoll und sicher eingesetzt werden können, müssen auch Querschnittsthemen (siehe Abbildung 1) berücksichtigt werden, die jedoch nicht alleine im Bereich der autonomen Systeme eine Rolle spielen und daher auch für andere Einsatzzwecke erforscht und entwickelt werden. Im Kontext autonomer Systeme ist in vielen Bereichen noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand erkennbar.

Infrastruktur

- **Flächendeckende Kommunikationsinfrastruktur:** Autonome Systeme sind unter Umständen auf den Austausch großer Datenmengen angewiesen. Insbesondere bei Ansätzen wie der Schwarmintelligenz ist ein kontinuierlicher Datenaustausch zwischen den einzelnen Teilsystemen erforderlich. Eine hinreichend dimensionierte Kommunikationsinfrastruktur, wie z.B. 5G-Mobilfunk, ist daher essentiell für eine sinnvolle Funktionsweise.

- **Verfügbarkeit von Geodaten:** Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfeld, benötigen autonome Systeme aktuelle Geodaten, Verkehrsdaten, Wetterinformationen und andere Umgebungsinformationen. Da autonome Fahrzeuge und Roboter ein präzises Umgebungsmodell brauchen, sind die Anforderungen an Geodaten sehr hoch in Bezug auf Detaillierungsgrad, Genauigkeit und Updategeschwindigkeit. Die Erfassung und Bereitstellung solcher Geodaten ist somit für den Betrieb von autonomen Systemen unerlässlich.
- **Cloud-Computing:** Autonome Systeme erzeugen und benötigen große Datenmengen sowie Rechenkapazitäten. Sowohl Daten wie auch Rechenkapazitäten werden notgedrungen als Cloud-Lösungen bereitgestellt werden müssen. Insbesondere bei der Auslagerung von kognitiven Funktionen sind leistungsfähige Rechenzentren notwendig, um die Berechnungs- und Übertragungszeiten so gering wie möglich zu halten.

Safety and Security

- **IT-Sicherheit:** Die Manipulationssicherheit und Robustheit autonomer Systeme ist eine wesentliche Herausforderung. Fahrzeuge, Roboter sowie autonome Steuerungssysteme z.B. für Versorgungsnetze, haben ein hohes Potenzial, bei entsprechenden Manipulationen, sehr große Schäden anzurichten. Neben den möglichen Hackerangriffen⁵ mit Kontrollübernahme des fahrenden Fahrzeugs, sind vor allem die Sensorsysteme autonomer Fahrzeuge eine Schwachstelle bei der Manipulationssicherheit. So konnten Forscher zeigen, dass nur wenig modifizierte Kamerabilder die Erkennung, z.B. von Fußgängern, verhindern⁶. Wissenschaftler in den USA konnten zeigen, dass leichte Veränderungen an Verkehrsschildern Sensorsysteme autonomer Fahrzeuge so irritieren, dass die Schilder nicht mehr zuverlässig erkannt werden⁷.
- **Funktionale Sicherheit:** Damit autonome Systeme in Zukunft eine Verbreitung finden, muss zwangsweise die funktionale Sicherheit gewährleistet werden. Neben entsprechenden Zertifizierungen, die die funktionale Sicherheit solcher Systeme bescheinigen, müssen Anwender über die Funktionsweise und die Grenzen autonomer Systemen informiert werden, um im Zweifelsfalls selbst eingreifen zu können. Fälle wie Verkehrsunfälle bei eingeschaltetem Autopiloten im Tesla Model S zeigen die Konsequenzen blinden Vertrauens in vermeintlich intelligente Systeme auf⁸.
- **Datenschutz:** Aufgrund der intensiven Vernetzung, der stetigen und präzisen Lokalisierung und der umfassenden Auswertung von Umgebungsinformationen generieren autonome Fahrzeuge und Systeme Datenbestände aus denen sich ohne weiteres personenbezogene Daten extrahieren lassen. Um eine gesellschaftliche Akzeptanz solcher Systeme zu erreichen, muss eine Transparenz über die erhobenen Daten gewährleistet werden, welche es den Anwendern erlaubt, selbst zu entscheiden, ob und wie die Systeme einge-

⁵ Vgl. Maier 2016.

⁶ Vgl. Rötzer 2017.

⁷ Vgl. Pluta 2017b.

⁸ Vgl. Shepardson 2017

setzt werden. Für den Einsatz im öffentlichen Raum müssen bestehende Datenschutzrichtlinien eingehalten bzw. diese entsprechend angepasst werden.

- **Sicherheitszertifizierungen und Testumgebung:** Zertifizierungswerkzeuge sind z.B. Fahrsimulatoren, die zum Test von Sensorsystemen autonomer Fahrzeuge eingesetzt werden⁹. Sie dienen der Sicherstellung eines definierten Systemverhaltens. Zertifizierung wird es in allen Anwendungsbereich in sehr unterschiedlicher Ausprägung geben müssen, da sich die jeweiligen Anforderungen je nach Anwendung und Einsatzumgebung erheblich voneinander unterscheiden. In die Zertifizierung werden auch funktionale Standards, IT-Sicherheits- und Datenschutz, ethische Überlegungen sowie Regularien einfließen müssen.

Regulierung und Standards

- **Standards:** Autonome Systeme benötigen in den meisten Anwendungsfällen ein umfassendes Bild über den sichtbaren und nicht sichtbaren Zustand ihrer jeweiligen Umgebung. Deshalb ist eine wesentliche Voraussetzung für gut funktionierende autonome Systeme ihre umfassende Vernetzung mit anderen Diensten und Systemen. Technische Standards, wie z.B. Schnittstellen für den Datenaustausch, sind notwendig, um die vielen beteiligten Teilsysteme miteinander zu verbinden. Hier profitieren autonome Systeme von Standards und Standardisierungsbemühungen im Bereich des Internet of Things, wie z.B. oneM2M¹⁰, den semantischen Web-Technologien, dem eng damit verbundenen World Wide Web Consortium (W3C¹¹) als Standardisierungsgremium für das Web sowie den Entwicklungen im künftigen 5G-Mobilfunk.

Im Kontext von Industrie 4.0 wird basierend auf existierenden Standards und semantischen Web-Technologien eine umfassende Referenzarchitektur (RAMI4.0, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0¹²) entwickelt, die die verschiedensten Komponenten in einer Produktionsumgebung interoperabel machen kann. Ganz ähnliche Konzepte wurden in dem Verbundprojekt „ARVIDA“ für den Bereich der virtuellen Techniken umgesetzt¹³.

Im Bereich von Smart Home und Smart Building existieren bereits etablierte Standards, wie z.B. KNX¹⁴, Zigbee¹⁵, Thread¹⁶, etc., die entsprechende Automationskomponenten verbinden. Da es jedoch sehr viele, untereinander inkompatible Standards gibt, werden aktuell große Anstrengungen unternommen, z.B. semantische Web-Technologien für einen übergreifenden Standard zu nutzen, um so automatisierte Gebäude untereinander, mit

⁹ Vgl. Greis 2017.

¹⁰ Vgl. oneM2M 2017.

¹¹ Vgl. W3C 2017.

¹² Vgl. Plattform Industrie 4.0 2016.

¹³ Vgl. Arvida 2016.

¹⁴ Vgl. KNX 2017.

¹⁵ Vgl. Zigbee Alliance 2017.

¹⁶ Vgl. Thread 2017.

dem Internet of Things, Smart Grid, Smart Service und Smart City Infrastrukturen vernetzen zu können.

- **Gesetzliche Regulierung:** Sehr ähnlich zu den technischen Standards existieren in den aktuellen Anwendungsgebieten autonomer Systeme umfassende Gesetzes- und Regelwerke, wie z.B. die Straßenverkehrsordnung, Regelwerke der gewerblichen Berufsgenossenschaften, etc., die genauso auf autonome Systeme angewendet werden müssen. Weil autonome Systeme sich an einigen entscheidenden Stellen von niedriger automatisierten Systemen unterscheiden, sind Anpassungen notwendig. Dies betrifft sowohl technische Standards als auch Regelwerke. Diese Prozesse haben gerade erst begonnen sind bei weitem nicht abgeschlossen. Abschnitt 2.6 beschreibt exemplarisch länderspezifische Regulierungsaktivitäten mit engem Bezug zu autonomen Systemen.
- **Datenhoheit:** Die Erhebung und Auswertung von Daten bildet das Fundament für die Funktion von autonomen Systemen. Es muss geklärt werden, wem die so erzeugten Daten rechtlich gehören und ob der Anwender einen Einfluss auf die Verbreitung dieser Daten hat. Insbesondere in kritischen Bereichen wie der industriellen Produktion, in der das Prozesswissen in der eigenen Fertigung einen großen Einfluss auf die Marktposition haben kann, muss der Aspekt der Datenhoheit geklärt werden.
- **Ethikdiskurs:** Die eigenständige Entscheidungsfindung und das entsprechende Handeln autonomer Systeme kann ethische und moralische Fragestellungen aufwerfen, die schon während der Entwicklung solcher Systeme und bei der Einrichtung von Regularien berücksichtigt werden müssen. In Deutschland wurde für das Anwendungsfeld Autonomes Fahren bereits die Ethik-Kommission Automatisiertes und Vernetztes Fahren ins Leben gerufen, die entsprechende Fragestellung beleuchtet und Leitlinien entwickelt hat¹⁷. Ähnliche Initiativen könnten auch für weitere Anwendungsbereiche notwendig sein.

Werkzeuge

- **Entwicklungswerkzeuge:** Autonome Systeme sind eine vergleichsweise neue und zugleich komplexe Technologie. Aus diesen Gründen fehlen bislang noch durchgängige Ansätze zum Systems Engineering sowie integrierte Entwicklungswerkzeuge zur Simulation, Planung und Entwurf, Konfiguration sowie zur Visualisierung.

Referenzarchitekturen¹⁸ für autonome Systeme sowie ganze Plattformen¹⁹ bzw. Betriebssysteme ermöglichen es Entwicklern, basierend auf erprobten Software-Bibliotheken, Beispielen und Entwurfsmustern eigene Anwendungen zu entwickeln. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher autonomer Systeme, Konfigurationen und Anwendungsgebieten werden Referenzarchitekturen mindestens teilweise sehr unterschiedlich sein müssen, um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden.

¹⁷ Vgl. BMVI 2017.

¹⁸ Vgl. Menge-Sonnentag 2017.

¹⁹ Vgl. Greis 2015.

- **Test- und Validierungswerkzeuge:** Simulationswerkzeuge erstellen in Kombination mit realen Testgeländen²⁰ aussagekräftige und für das maschinelle Lernen optimierte virtuelle Szenarien für das Training autonomer Systeme. Wie aussagekräftige Szenarien auszusehen haben und welche Menge an Szenarien für den sicheren Betrieb autonomer Fahrzeuge ausreichend sind, bleiben Forschungsthemen.

Der Gedanke, Leitzentralen für die Überwachung und den sicheren Betrieb von autonomen Systemen einzurichten, kommt aus dem Umfeld des autonomen Fahrens und der Erkenntnis, dass es immer Situationen geben kann und wird, in denen ein autonomes Fahrzeug menschliche Entscheidungshilfe benötigt²¹.

1.3 Anwendungsfelder für autonome Systeme

Autonome Systeme werden dem Menschen künftig in unterschiedlichen Lebens- und Arbeitskontexten begegnen (Abbildung 3). Es werden dabei höchst unterschiedliche autonome Systeme eingesetzt, die an das jeweilige Umfeld und die jeweilige Applikation angepasst sein müssen. Die sich daraus ergebenden und speziellen Anforderungen an die jeweiligen Kern- und Querschnittstechnologien bilden einen wichtigen Forschungsgegenstand (siehe Abschnitt 2.3). Gleichzeitig stehen viele Anwendungsfelder miteinander in Wechselbeziehung, wie es sich am Beispiel des Smart Home und dessen Interaktion mit den Sektoren Energie, Mobilität und Gesundheit klar zeigt. Die Anforderungen, die sich aus dem Einsatz autonomer Systeme in einem bestimmten Anwendungsfeld ergeben, dürfen daher nicht isoliert betrachtet werden und bilden eine zentrale Herausforderung für die Systemintegration.

1.3.1 Mobilität

Der Mobilitätssektor steht vor großen Herausforderungen, einerseits durch den weltweit steigenden Mobilitätsbedarf von Personen und Gütern, andererseits durch die Anforderung die Mobilität der Zukunft effizienter, sicherer, ressourcen- und klimaschonender zu gestalten. Gleichzeitig gilt es die Anforderungen einer alternden Gesellschaft an die individuelle Mobilität und damit die soziale Teilhabe zu erfüllen.

Die zunehmende Vernetzung und Automatisierung von Fahrzeugen und Infrastruktur kann dazu beitragen, diese Herausforderungen zu adressieren. Das zukünftige Mobilitätssystem wird aus einem Mix unterschiedlicher Mobilitätsformen bestehen, in dem sich (teil-) autonome Fahrzeuge und Systeme in Echtzeit über Objektzustände, Streckendaten und Umwelteinflüsse austauschen und damit eine intelligente und effiziente Steuerung der Verkehrsflüsse und datenbasierter Mobilitätsdienste ermöglichen können. Gleichzeitig kann die zunehmende Automatisierung dazu beitragen, das Mobilitätssystem sicherer zu gestalten. Technologien im Fahrzeugbereich wie Spurhalte-, Notbrems-, und Einparkassistenten kommen derzeit bereits in Form von Fahrerassistenzsystemen vielfältig zum Einsatz.

²⁰ Vgl. Pluta 2017a.

²¹ Vgl. Sokolov 2017.

Abbildung 3 Anwendungsgebiete für Autonome Systeme

 <p>Mobilität</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Personenbeförderung und Passagierverkehr (Kraftfahrzeuge, öffentlicher Nah- und Fernverkehr, Flug-, Schienen- und Schiffsverkehr) ▪ Gütertransport (Fahrerlose Transportsysteme, Straßen-, Schienen-, See-, und Lufttransport)
 <p>Industrielle Produktion</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fertigung (Kollaborative Robotik, Bauteilhandling, autonome Fertigungsmodule, Montage-Assistenzsysteme und Anlagenbedienung) ▪ Verarbeitung (Schneidemaschinen für Lebensmittel und Textil) ▪ Abbau (Fördermittel und -maschinen) ▪ Logistik (Fahrerlose Transportsysteme, autom. Nachbestellung)
 <p>Smart Home</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Serviceroboter, Intelligente Haushaltsgeräte ▪ Smart Building (Teilgebiete Energie, Sicherheit, Komfort und Assistenz). ▪ Gebäudetechnik (Building Automation) ▪ Unterhaltung (Soziale Roboter, Spiele, VR/AR-Simulationen)
 <p>Menschenfeindliche Umgebungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontroll- und Wartungssysteme (z.B. im submarinen Bereich, Anwendungen in Nuklearreaktoren, chemische und biotechnologische Anlagen) ▪ Such- und Bergungssysteme (Katastrophenszenarien ("Desaster robotics", Kampfstoffe) ▪ Verteidigung ▪ Exploration und Erkundung (Luftfahrt, Drohnen, z.B. zur Verkehrsüberwachung, Raumfahrt)
 <p>Gesundheit</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medizin (Systeme zur Funktionswiederherstellung, Ausbildungs-/Trainings-, Operations-, Diagnose- und Therapiesysteme) ▪ Pflege (Serviceroboter, Assistenzsysteme) ▪ Pharma (Laboranalytik)
 <p>Energie</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Energieproduktion (Smart Energy, Gasturbinen, Mining (Bergbau), Kraftwerksbetrieb und ggf. -rückbau) ▪ Energieverteilung (Smart Grid und das Management von Stromnetzen)
 <p>Landwirtschaft</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ernte-, Transport-, Verarbeitungs- und Lagersysteme

(Quelle: acatech, DFKI, IEM; ausgewählte Beispiele in Klammern)

Langfristig zielt die Entwicklung allerdings auf das fahrerlose Fahren ab, bei dem die Fahrzeuge in unstrukturierten Umgebungen, wie beispielsweise dem Straßenverkehr, alle Entscheidungen und Aufgaben ohne menschliches Eingreifen durchführen können.²² Im Bereich der marinen Anwendungen wird derzeit an autonomen Schiffen, autonomen Fähren²³ und entsprechenden Hafeninfrastrukturen geforscht, die neben dem Transport auch ein autonomes Be- und Entladen umfassen²⁴.

Im Bereich Luftfahrt ist der Einsatz eines Autopiloten seit vielen Jahren Standard, so dass sich Piloten außerhalb von Start und Landung primär auf die Überwachung von Abläufen konzentrieren. Autonome Flugzeuge sollen dagegen völlig ohne Piloten an Bord auskommen können. Diese Entwicklung wird einerseits vom derzeit zu beobachtenden Pilotenmangel und andererseits vom wirtschaftlichen Druck auf die Fluggesellschaften getrieben. Die großen Hersteller arbeiten daher an entsprechenden Konzepten^{25,26,27}. Im militärischen Bereich werden autonom fliegende Hubschrauber getestet²⁸.

Für die unterschiedlichen Automatisierungsstufen bis hin zum autonomen System wurden formale Unterscheidungskriterien festgelegt, wie in der Diskussion in Abschnitt 1.3 beschrieben. Allerdings bleiben die Übergänge zwischen den einzelnen Stufen fließend und können sich je nach Anwendungsbereich oder Einsatzszenario unterscheiden. Beispielsweise werden für das autonome Fahren in Deutschland fünf Automatisierungsgrade unterschieden²⁹, in den USA werden von der Straßenverkehrsbehörde NHTSA vier Automatisierungsstufen definiert. Dabei entsprechen die Stufen eins bis drei dem deutschen System, während Stufe vier das vollautomatisierte und autonome Fahren vereint³⁰. Die Unterscheidung der Automatisierungsstufen in Abschnitt 1.3 wurde mit Blick auf die Vergleichbarkeit zwischen den in dieser Studie untersuchten Anwendungsbereichen erstellt, mit der Konsequenz, dass die dargestellten Automatisierungsstufen für den Bereich des Straßenverkehrs dem US-amerikanischen System entsprechen. Entsprechend muss darauf hingewiesen werden, dass das Anwendungsfeld der Mobilität in der vorliegenden Studie die Bereiche der Personenbeförderung, des Passagierverkehrs und des Gütertransports auf Straße und Schiene, sowie zu Land und zu Wasser beinhaltet. Allein im Bereich des Flugverkehrs und dem derzeit bereits stattfindenden Einsatz von Autopiloten steht die Diskussion zur Klassifizierung dieser Automatisierungsstufe noch aus.

²² Vgl. Lemmer 2016.

²³ Vgl. Dilba 2017.

²⁴ Vgl. Condliffe 2016.

²⁵ Vgl. Airbus 2017.

²⁶ Vgl. Odrich 2017a.

²⁷ Vgl. Hintze 2017.

²⁸ Vgl. Odrich 2017b.

²⁹ Vgl. Lemmer 2016.

³⁰ Vgl. Greis 2015.

1.3.2 Industrielle Produktion

Die Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik eröffnen zunehmend neue Möglichkeiten, um Verbesserungen zukünftiger Maschinen und Anlagen zu realisieren. Die Vernetzung technischer Systeme und die Verschmelzung der virtuellen mit der physikalischen Welt werden im Bereich der industriellen Produktion unter dem Begriff Cyber-Physical Systems (CPS) zusammengefasst. Darunter werden offene, vernetzte Systeme verstanden, die mithilfe von Sensoren Daten zu Situationen der physikalischen Welt erfassen, sie interpretieren und für netzbasierte Dienste verfügbar machen sowie mittels Aktoren direkt auf Prozesse in der physikalischen Welt einwirken und damit das Verhalten von Geräten, Dingen und Diensten steuern können³¹. Durch den zunehmenden Einsatz von CPS in der industriellen Produktion vollzieht sich derzeit ein tief greifender Wandel. Der Begriff Industrie 4.0 steht für diesen Wandel und bezeichnet eine neue Stufe der Organisation und Steuerung komplexer Wertschöpfungsnetzwerke³². Wesentlicher Wegbereiter der sogenannten vierten industriellen Revolution sind dabei Cyber-Physical Systems, deren konsequente Weiterentwicklung in der Umsetzung von autonomen Systemen mündet.

Die Notwendigkeit für einen Einsatz solcher Systeme ergibt sich unter anderem aus einer zunehmenden Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten bei gleichzeitig sinkenden Fertigungskosten, welche nur mittels einer wandelbaren und flexiblen Fertigung realisiert werden können. Ziel sind intelligente und vernetzte Fabriken, die in dynamischen Wertschöpfungsketten agieren und sich laufend selbst optimieren und so trotz individualisierter Produktion eine Senkung der Kosten ermöglichen. Solche intelligenten Fabriken werden auf den Einsatz einer Vielzahl unterschiedlicher autonomer Systeme und deren enger Verzahnung angewiesen sein.

Ein mögliches Anwendungsbeispiel für autonome Systeme in der Produktion sind Maschinen und Anlagen, die laufend den eigenen Zustand sowie die Umgebungsdaten erfassen und auf Basis von Datenanalyse- und maschinellen Lernverfahren die Fertigungsprozesse bedarfsgerecht rekonfigurieren und optimieren können, um so flexibel auf eingehende Aufträge zu reagieren. Ein weiteres Beispiel sind die im Bereich der Intralogistik zunehmend eingesetzten Fahrerlosen Transportsysteme, die eine bedarfsgerechte und effiziente Bereitstellung von Waren ermöglichen. Durch die Integration von maschinellen Lernverfahren und Ansätzen wie der Schwarmintelligenz werden diese Systeme zukünftig auch ohne zentrale Leitstellen auskommen und ihre Aufgaben vollständig autonom und dezentral abwickeln können. Durch eine dynamische Vernetzung der einzelnen Teilsysteme (Maschinen und Anlagen, Transport- und Wartungssysteme, Auftragsabwicklungssysteme etc.) ohne die Notwendigkeit von menschlichem Eingreifen wird der Weg zu einer vollständig autonomen und standortübergreifenden industriellen Fertigung im Sinne der intelligenten Fabrik geebnet.

³¹ Vgl. Geisberger/Broy 2012

³² Vgl. Kagermann et al. 2013

1.3.3 Smart Home

Im Gebäudebereich nehmen die Anforderungen an Energieeffizienz, Sicherheit-, Komfort- und Assistenzfunktionen stetig zu und treiben damit die Entwicklung von Smart-Home-Technologien voran³³. Erwartungen bezüglich der Marktentwicklung von Smart Homes sind daher sehr positiv und gehen von einer Verdopplung der Anzahl der Haushalte mit smarten Installationen in Deutschland auf ca. 1 Millionen bis 2020 aus³⁴. Ein autonomes Smart Home oder Smart Building wird in naher Zukunft ein wesentlicher Baustein vieler digitaler oder hybrider Dienste sein. Das Gebäude wird zunehmend zur Informationsübernahme- und Interaktionsschnittstelle für zahlreiche digitale Dienste und ergänzt somit das Smartphone, dem heute diese Rolle zukommt.

Energie: Wie in Abschnitt 1.3.6 beschrieben, ist ein Gebäude ein wesentlicher Faktor bei Energieverbrauch und dezentraler Erzeugung. Intelligente, selbstlernende Gebäude können erheblich zu mehr Energieeffizienz beitragen indem sie Geräte, Speichermedien, Heizanlagen, etc. flexibel und feingranular steuern und sich dabei stetig an die Bedürfnisse der Bewohner und auch der Energienetzstabilität anpassen. Im Kontext der Elektromobilität wird das Gebäude zu einer zentralen Stelle, an der Energie für Mobilität bereitgestellt wird.

Assistenz und Pflege: In einer alternden Gesellschaft wird ein autonomes Gebäude ein wesentlicher Ort für medizinische Dienstleistungen sein. Die Informationen aus dem Gebäude über die zu betreuenden Personen geben wesentliche Hinweise zum aktuellen Gesundheitsstand und zur Beurteilung eventueller Notsituationen. Durch die ausgeprägten Selbstlernfunktionen und die intelligente technische Ausstattung kann ein autonomes Gebäude bei der Betreuung und der Vermeidung von Notfällen wesentlich unterstützen.

Mobilität: Ein Gebäude ist in den meisten Fällen Anfangs- oder Endpunkt einer (autonomen) smarten Mobilitätsdienstleistung. Dem Gebäude kommt daher bei der Planung der Mobilität im Zusammenspiel z.B. mit Smart City Informationen (Verkehrsdichte, verfügbare Mobilitätsträger, etc.), eine Schlüsselrolle zu. Ein autonomes Gebäude weiß, wie viele Mitarbeiter vor Ort sind und wann sie voraussichtlich das Gebäude verlassen, ein autonomes Buchungssystem für Mobilitätsdienstleistungen kennt die Auslastung der Verkehrsträger, etc. Diese Informationen fließen letztlich im autonomen Gebäude zusammen und werden dem Nutzer oder Bewohner im Gebäude zur Verfügung gestellt.

1.3.4 Menschenfeindliche Umgebungen

Die Haupteinsatzfelder für autonome Systeme in menschenfeindlichen Umgebungen sind beispielsweise unter Wasser, im Weltraum, in kontaminierten Umgebungen, in Umgebungen mit Extrembedingungen oder bei Bedrohung durch andere Menschen zu finden. Konkrete Einsatzmöglichkeiten finden sich demzufolge beim Katastropheneinsatz, der Exploration, bei der Inspektion und Wartung von Infrastrukturen sowie beim Rückbau von Kernkraftanlagen. Ziel der Entwicklung teil-/autonomer Systeme ist z.B. deren Einsatz als Rettungs- und Löschroboter oder

³³ Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

³⁴ Vgl. BMBF 2014.

für die Verrichtung gefährlicher Bergungsarbeiten sowie zur Sicherung von Gefahrbereichen nach Unfällen³⁵.

Die sehr unterschiedlichen Gefährdungslagen oder die Komplexität der Aufgaben in menschenfeindlichen Umgebungen führen zu speziellen Anforderungen an den Autonomiegrad der eingesetzten Systeme. In besonders schwierigen Situationen kann es von Vorteil sein, eine reine Fernsteuerung mit entsprechender visueller und haptischer Rückkopplung einzusetzen. Routineaufgaben wie An- und Abfahrten aber auch eine großräumige Dekontamination können dagegen bereits mit einem hohen Autonomiegrad durchgeführt werden. Weit entfernte Einsatzorte wie der Weltraum lassen wegen der eingeschränkten Kommunikation teils nur den Einsatz von (teil-)autonomen Systemen zu. Da die komplexen Herausforderungen menschenfeindlicher Umgebungen in absehbarer Zeit noch eine Beteiligung des Menschen erfordern werden, um Entscheidungen von rechtlicher oder ethischer Tragweite treffen zu können, sind situativ anpassbare Autonomiegrade in diesem Anwendungsfeld von besonderer Bedeutung. Demzufolge stellen menschenfeindliche Umgebungen auch besondere Anforderungen an die zuverlässige Kommunikation zwischen Mensch und Maschine sowie die konkrete Mensch-Maschine Interaktion und Kooperation.³⁶

Die verbleibenden technologischen Herausforderungen für den Einsatz ferngesteuerter und teil-/autonomer Systeme in menschenfeindlichen Umgebungen betreffen unter anderem die Energieversorgung und das Energieharvesting, die Entwicklung von speziellen (z.B. druckfest, strahlungsschirmend, etc.) und robusten Materialien, zuverlässige Kommunikationssysteme und die Motorentechnologie³⁷.

1.3.5 Gesundheit

In der Medizin unterstützen Robotersysteme bereits seit einiger Zeit bei Operationen, insbesondere in der Urologie und der Orthopädie. Die Forschung bei Operationssystemen ist in Deutschland weit entwickelt. Einzelne Lösungen wie etwa eine Plattformtechnologie, in der die Roboterarme Bewegungen mit hoher Präzision ausführen, sind bereits marktreif.³⁸ Autonome, intelligente Operationsroboter könnten dagegen die Operateure wesentlich stärker mit intelligenten Funktionen, wie z.B. zur Fehlervermeidung, unterstützen.

Im Bereich der Pflege reicht die Bandbreite von Robotern, die das Pflegepersonal im stationären Bereich unterstützen bis hin zu medizinischen Dienstleistungen, die entsprechend bedürftigen Menschen im eigenen Zuhause helfen, länger und sicher im gewohnten Umfeld leben können. Diese medizinischen Dienstleistungen sind sehr eng an die entsprechende Sensorik und Aktorik eines autonomen Smart Homes gekoppelt.

³⁵ Vgl. BMBF 2016.

³⁶ Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

³⁷ Vgl. Floreano/ Wood 2015; Wynn et al. 2014.

³⁸ Vgl. DLR 2014.

Des Weiteren steht der Einsatz des kognitiven Systems IBM Watson exemplarisch für die zu erwartenden Veränderungen im Gesundheitswesen³⁹. Durch die Analyse großer, medizinischer Datenbestände, die Bereitstellung relevanter Informationen sowie das Erkennen möglicherweise unbekannter Zusammenhänge sollen autonome Systeme Ärztinnen und Ärzte in der Prävention und Diagnose von Krankheiten und dem Verordnen passender Therapien unterstützen. Denkbar sind außerdem autonome Software-Systeme, die mit intelligenten Funktionen die Therapien erheblich stärker als heute begleiten.

1.3.6 Energie

Die Energiewende zielt neben der Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien und der damit verbundenen Dezentralisierung der Energieerzeugung auch auf die Steigerung der Energieeffizienz ab. Um die bedarfsgerechte Erzeugung und Bereitstellung von Energie sicherstellen zu können, bedarf es daher einer intelligenten Steuerung und Vernetzung. Denn statt zentraler Erzeugungsstrukturen werden im Energiesystem der Zukunft dezentrale Erzeuger von Energie, Energieversorger, intelligente Netze, Stromzähler und Haushaltsgeräte sowie mögliche Energiespeicher miteinander interagieren müssen. Experten gehen daher davon aus, dass die mit der Energiewende zunehmende Komplexität der Energieerzeugung und -verteilung ohne den Einsatz autonomer Systeme nicht zu bewältigen sein wird.

Wie in Abschnitt 1.3.3 beschrieben bestehen im Anwendungsbereich Energie sehr enge Verbindungen zum autonomen Smart Home / Smart Building, da Gebäude sowohl Energieverbraucher als auch Erzeuger sein können und ein sehr großer Teil des Energieverbrauchs und der somit möglichen Effizienzgewinne in diesem Bereich liegen. Beispielsweise kann das Smart Home über eine intelligente Heizungssteuerung, die sich an die Aktivitäten der Bewohner anpasst, zu einer Steigerung der Energieeffizienz beitragen. Über Technologie- und Verschlüsselungsansätze wie Blockchain kann ein horizontaler Stromhandel zwischen Nachbarinnen und Nachbarn ermöglicht werden, um Überschüsse in der Stromproduktion des eigenen Smart Homes abzufangen. Schließlich kann das Smart Home über die vertikale Einbindung in die Netz- oder Handelsaktivitäten eines Energielieferanten seine Erzeugungskapazitäten bereitstellen und damit beispielsweise zu einer Erhöhung der Netzstabilität beitragen.⁴⁰

1.3.7 Landwirtschaft

Einer kontinuierlich ansteigenden Weltbevölkerung bei einer gleichbleibenden bzw. sogar leicht zurückgehenden Ackerfläche weltweit kann nicht mit einer klassischen Landwirtschaft begegnet werden. Ebenso wie viele andere Bereiche des täglichen Lebens profitiert aber auch die Landwirtschaft von der zunehmenden Digitalisierung. Selbstlenkende Mähdrescher, zum Beispiel, die auf Basis von satellitengestützter Navigation die optimale Spur auf dem Feld halten können, befinden sich schon seit vielen Jahren im produktiven Einsatz. Nur durch die ständige Weiterent-

³⁹ Vgl. Weißmann und Deutsch 2016.

⁴⁰ Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

wicklung innovativer Landtechnik, die einen gesteigerten Ernteertrag ermöglicht, kann in Zukunft dem weltweit steigenden Nahrungsbedarf begegnet werden⁴¹.

Die Landwirtschaft stellt somit einen wesentlichen Anwendungsbereich für den Einsatz autonomer Systeme dar, da nur auf diese Weise die komplexen landwirtschaftlichen Prozesse automatisierbar werden. Im Vergleich zur industriellen Massenfertigung nämlich, lässt sich der Ernteprozesse deutlich schwieriger automatisieren, da hierbei die Handhabung einer deutlich größeren Zahl an Störgrößen erforderlich ist. Systeme, die selbstständig in solchen Prozessen agieren müssen, sind auf die Fähigkeit angewiesen, auch in ungeplanten Situationen eine Entscheidungsfindung zu durchlaufen. Insbesondere kommt in der Landwirtschaft das Zusammenspiel aus zahlreichen Einzelsystemen und deren dynamischer Vernetzung bei gleichzeitig stark veränderlichen Umgebungsbedingungen zum Tragen. Während beispielsweise der autonome Mähdrescher fahrerlos die optimale Route zentimetergenau auf dem Feld abfährt und das Getreide erntet, muss parallel hierzu ein autonomes Transportfahrzeug die geernteten Getreidekörner aufnehmen. Sobald ein kritischer Ladezustand erreicht wird, muss ein weiteres Transportfahrzeug angefordert werden und ein reibungsloser Wechsel zwischen dem vollbeladenen und den leeren Fahrzeug erfolgen. Auch der Einsatz autonomer Drohnen, die die Wachstums- und Ernteprozesse auf dem Feld genau analysieren können, ist in einem solchen Zukunftsszenario denkbar.

1.3.8 Weitere Anwendungsfelder

Autonome Aufklärungs- und Waffensysteme werden sowohl für Einsätze auf dem Wasser, in der Luft als auch an Land entwickelt. Das Anwendungsspektrum reicht dabei von Schiffen, Drohnen bis hin zu autonom agierenden Fahrzeugen bzw. Robotern und es wird zwischen bewaffneten Systemen und Systemen zur Aufklärung unterschieden. Die sich aufdrängende, ethische Frage, ob ein autonomes System ebenso autonom seine Waffen einsetzen darf, beschäftigt die Weltgemeinschaft.

Polizeiliche Anwendungen, wie z.B. autonome Überwachungsroboter in der Stadt Dubai, nutzen kleine rollende Roboterfahrzeuge zur flächigen, mobilen Überwachung des Stadtgebietes. Die Roboter werden durch eine Drohne ergänzt, die das Umfeld bedarfsweise und gesteuert von einer Leitstelle aus der Luft erkundet. Mobile Roboter werden auch zur Terrorbekämpfung eingesetzt. Auch hier ergeben sich aus den besonderen Fähigkeiten autonomer Systeme ethische, gesellschaftliche und regulatorische Fragestellungen.

Militärische und polizeiliche Anwendungen sind ohne Zweifel ein großer Markt sowie technologische Treiber für autonome Systeme. Aufgrund der bisher ungelösten gesellschaftlichen, ethischen und rechtlichen Fragen werden sie im Kontext dieser Studie nicht weiter betrachtet.

⁴¹ Vgl. Becker 2017

2 Aktueller Entwicklungsstand

Autonome Systeme setzen sich aus mehreren Einzeltechnologien zusammen (Abschnitt 1.2), die einzeln betrachtet teilweise bereits langjährig bestehende, etablierte Forschungsgebiete darstellen. Ein Forschungsgebiet „Autonome Systeme“ entwickelt sich gerade erst. Auch wissenschaftliche Konferenzen und Veröffentlichungen zum konkret fokussierten Thema ‚autonome Systeme‘ sind zum Zeitpunkt der Studiererstellung in der Entstehung. Eine Recherche nach autonomen Systemen allein kann derzeit daher nur wenig Aussagekraft zum Stand der Forschung der einzelnen technologischen Komponenten erzielen. Die Studienautoren haben deshalb wichtige Akteure und Kooperationen auf Basis von umfassenden Internetrecherchen zusammengetragen. Für eine qualitative Evaluation von aktuellen Anwendungsgebieten sowie Kooperationen wurden Meldungen deutschsprachiger Newsgroups und anderer digitaler Medien aus dem Zeitraum 2015 bis 2017 nach den Begriffen „autonom“, „autonomes Fahren“, „autonome Systeme“ sowie „künstliche Intelligenz“ und „maschinelles Lernen“ gefiltert und manuell ausgewertet. Anwendungen aus dem militärischen Bereich wurden dabei nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dokumentiert.

Zusätzlich wurden nationale und europäische Förderdatenbanken bzw. entsprechende Internet Portale nach denselben Begriffen durchsucht. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.5 beschrieben. Parallel zu der Recherche wurden Expertenbefragungen sowie ein Expertenworkshop durchgeführt (siehe Kapitel 3). Den befragten Experten wurden die herausgearbeiteten Aussagen, wie z.B. zur weltweiten Arbeitsteilung, den erkennbaren Trends, etc., zur Evaluation vorgelegt. Die Anmerkungen der Experten sind in die nachfolgenden Abschnitte eingeflossen.

2.1 Branchen und Kooperationen

Vor allem bei der Realisierung von höheren Autonomiegraden benötigen autonome Systeme eine Vielzahl unterschiedlicher Hard- und Software-Komponenten, was hohe Anforderungen an die technische Umsetzung mit sich bringt. Für jede Komponente ist ein umfassendes Systemwissen erforderlich, um die anspruchsvollen Aufgaben erfüllen zu können. Nach bisherigem Evaluationsstand sind offenbar selbst finanziell sehr gut ausgestattete Konzerne nicht in der Lage, ohne Kooperationen alle notwendigen Technologiebausteine aus eigener Kraft aufzubauen und entsprechend den Anwendungsanforderungen technologisch zu beherrschen. Dahingehende Versuche großer IT-Konzerne sind inzwischen wieder beendet worden. Vielmehr ist nun ein Trend zu Spezialisierung auf eine Schlüsseltechnologie, wie z.B. das maschinelle Lernen, zu beobachten. Schlüsselkompetenzen werden in internationale Kooperationen in diesem Umfeld weit verbreitet. Diese können jedoch unter Umständen eine große Abhängigkeit ganzer Branchen von wenigen Technologieunternehmen mit den entsprechenden Schlüsselkompetenzen bedeuten.

Die Auswertung von Kooperationsaktivitäten (Tabelle 1) zeigt einen Trend zu einer weltweiten Arbeitsteilung mit Spezialisierungen auf einzelne Teildisziplinen im Kontext autonomer Systeme. Gleichzeitig unterstreicht die Auswertung die umfassenden Aktivitäten im bzw. ein hohes mediales Interesse an dem Bereich des autonomen Fahrens. Die Kooperationen von Herstellern aus den Bereichen Computing setzen sich aus Firmen zusammen, die einerseits spezielle Hard-

ware z.B. für das beschleunigte Auswerten von Sensordaten und für Verfahren des maschinellen Lernens bereitstellen und andererseits die entsprechende Software-Systeme bzw. Programmier-Frameworks für maschinelles Lernen und andere Verfahren aus der künstlichen Intelligenz umsetzen.

Tabelle 1 Auswahl typischer Kooperationen (ohne militärische Komponenten und Anwendungen)

Branchen und Themengebiete	Kooperationsziele	Beteiligte Partner
Autonomes Fahren	Technologieentwicklung für autonomes Fahren in höheren Autonomiestufen (Level 3, 4 und 5)	IT-Konzerne, Automobilhersteller
Autonome Robotik	Autonome Unterwasserrobotik, Entwicklung von Roboterschwärmen Robotik für Sicherheits- und Überwachungsanwendungen	Forschungsinstitute, Offshore-Unternehmen Städte, Hersteller von autonomen Kleinstfahrzeugen
Autonome Logistiksysteme	Autonome Auslieferung	Versandunternehmen, Hersteller autonomer Fahrzeuge oder Drohnen
Autonome Nutzfahrzeuge	Autonome Nutzfahrzeuge für öffentliche Straßen, Platooning, autonomer Verkehr in geschlossenen Umgebungen, z.B. Minen	Nutzfahrzeughersteller, Logistikunternehmen und Minenbetreiber
Autonome Taxidienste	Technische Entwicklung autonomer Taxidienste, Aufbau von Testflotten	Entsprechende Dienstleister und Automobilhersteller sowie teilweise auch Zulieferer
Autonomer Schiffsverkehr	Entwicklung von autonomen Schiffen, geeigneten Hafeninfrastrukturen sowie autonomen Be- und Entladeeinrichtungen	Forschungsinstitute, Hafenbetreiber, Werften, Zulieferer für den Schiffsbau, Reedereien
Autonomer öffentlicher Nahverkehr	Entwicklung und Test autonomer Busse in realen Testfeldern Entwicklung und Test von autonomen Schienenfahrzeugen	Mobilitätsanbieter bzw. Städte, Hersteller von autonomen Bussen, Geodatenanbieter Bahnunternehmen, Hersteller von rollendem Material
Mensch-Autonomes System-Interaktion	Neue bzw. verbesserte Interaktionsformen	Automobilhersteller, IT-Konzerne
Cloud-Infrastrukturen	Relevante Cloud Infrastrukturen und Dienste für autonomes Fahren	Automobilhersteller, IT-Konzerne

Vernetzung autonomer Systeme	(Echtzeitfähige) Vernetzung von autonomen Fahrzeugen mit Cloud-Infrastrukturen	IT-Konzerne, Zulieferer, Automobilhersteller
Maschinelles Lernen	Verbesserung des maschinellen Lernens im Kontext des autonomen Fahrens	Automobilhersteller, IT-Konzerne und/oder spezialisierte Startups
Umgebungserfassung	Neue, bzw. kleinere und großserientaugliche Sensorsysteme für Fahrzeuge und Roboter	Sensor-, Software- und Automobilhersteller, Zulieferer
Umgebungsdaten	Höchstauflösende, stets aktuelle Karten und Umgebungsmodelle	Geodatenanbieter, Automobilhersteller, Software-Hersteller
Standardisierung	Standardisiertes Verhalten autonomer Fahrzeuge sowie die nötigen Updates hierzu	Automobilhersteller
Prozessoren und Rechner für autonome Systeme	Entwicklung von leistungsfähigen, für KI-Methoden und schnelle Sensordatenverarbeitung geeignete Prozessoren	Automobilhersteller, Hardware-Hersteller, IT-Konzerne
Simulationsverfahren	Simulationsverfahren für maschinelles Lernen mit virtuellen Modellen, virtuelle Testverfahren und Zertifizierung	Automobilhersteller, Forschungsinstitute, Zulieferer, Sensorhersteller
Integrierte Plattformen für autonomes Fahren	Integrierte Plattformen für autonomes Fahren Offene Software-Plattformen für Steuergeräte	Sensor-, Software- und Automobilhersteller, Zulieferer, IT-Konzerne
Testfelder für autonomes Fahren	Test von autonomen Fahrzeugen in unterschiedlichen Fahrumgebungen Bei Testfeldern für öffentlichen Nahverkehr System- und Akzeptanztests mit realen Fahrgästen	Städte und Kommunen bzw. der Bund sowie Fahrzeughersteller
Testrouten für autonomen Schiffsverkehr	Test von autonomen Schiffen, Hafeninfrastrukturen sowie Be- und Entladesituationen	Werften, Forschungsinstitute, Hafenbetreiber, Systemhersteller

2.2 Trends

Die Recherche und Auswertung der Meldungen zum Themenkomplex Kooperationen (Abschnitt 2.1) lässt einige weltweite Trends erkennen. Allerdings ändern sich industrielle Strategien und Kooperationen sehr schnell, so dass in kurzer Zeit neue Kooperationen und Allianzen von Welt-rang entstehen können, die die nachfolgenden Trends relativieren.

- Das autonome Fahren, Robotik sowie die Logistik sind derzeit die Haupttreiber für autonome Systeme.
- Amerikanische Unternehmen sowie im militärischen Bereich auch die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) betreiben bereits seit einigen Jahren umfassende Forschung im Bereich autonomer Systeme. Die großen IT-Konzerne sowie Automobilhersteller, Versandhändler und Mobilitätsanbieter sind zusammen mit internationalen Automobilherstellern die wesentlichen, treibenden Faktoren. Die Internet-Konzerne Amazon, Uber, Apple, Alphabet (Waymo), etc. haben eigene Forschungsabteilungen zum autonomen Fahren bzw. zu dessen Teildisziplinen, z.B. Vernetzung, maschinelles Lernen und Cloud-Infrastrukturen. Fahrdienste (Uber, Lyft) sind Kooperationspartner und ebenfalls Treiber für das autonome Fahren mit aktuell laufenden Testprogrammen⁴².
- Die ursprüngliche Tendenz bei den IT-Konzernen, auch eigene Fahrzeuge zu entwickeln, scheint nachzulassen. Die IT-Konzerne beenden diese Projekte zugunsten der Algorithmen- und Plattformentwicklung für maschinelles Lernen, künstliche Intelligenz, Datenanalyse und Cloud-Infrastrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Hardware-Entwicklung. Alle großen Hardware-Hersteller arbeiten daran, die KI-Methoden und vor allem maschinelles Lernen auch in mobilen Anwendungen zu beschleunigen.
- Japanische Konzerne aus dem Robotikbereich, dem Automobilsektor wie auch aus dem Schiffsbau treiben die Anwendung autonomer Systeme. Es entstehen weitreichende Kooperationen, die auch die Chipherstellung umfassen.
- China verfügt über teilweise direkt mit den amerikanischen IT-Konzernen konkurrierende Firmen, die in Kooperationen international aktiv sind. Die starke Förderung der Elektromobilität und der entsprechenden Automobilfirmen wird zugleich auch für autonomes Fahren genutzt. Aufgrund der guten Akzeptanz in der Bevölkerung^{43,44} wie auch der verfügbaren Testfelder kann von einer weiter steigenden Position Chinas im Themenfeld autonomer Systeme ausgegangen werden.
- In Deutschland sind starke Aktivitäten in den Bereichen autonomes Fahren, Testfelder für autonomes Fahren, submarine Anwendungen sowie Sensortechnologien zu beobachten. Große Automobilkonzerne und Zulieferer haben Forschungszentren zum Themenkomplex autonomes Fahren bzw. Systeme eingerichtet und bauen darin entsprechende

⁴² Vgl. Uber 2017.

⁴³ Vgl. Barth 2016, S. 49.

⁴⁴ Vgl. Deloitte 2017.

Kompetenzen auf. Große Logistikdienstleister testen Lieferketten mit autonomen Kleinfahrzeugen sowie Drohnen.

- Französische Unternehmen bauen autonome Busse, die auf Testfeldern in Frankreich, den Niederlanden, der Schweiz, in Dänemark und Deutschland erprobt werden. Die französische Autoindustrie ist durch die Kooperationen mit japanischen Autoherstellern sowie europäische Forschungsprojekte intensiv im Bereich autonomes Fahren aktiv.
- In den Niederlanden befinden sich Testfelder für autonome Busse. Geplant ist auch ein Testfeld für autonome Boote auf dem Kanalnetz in Amsterdam.
- Norwegen errichtet eine Testroute für den autonomen Schiffsverkehr und entwickelt ein autonomes Elektroschiff. Die Forschungsinstitution SINTEF forscht im Bereich autonomer Schiffe.
- Britische Unternehmen entwickeln Technologien für autonome Schiffe und kooperieren hierzu mit amerikanischen IT-Konzernen. Zudem wurden und werden in Großbritannien zahlreiche Testfelder inklusive entsprechender Förderung für autonomes Fahren eingerichtet.
- Dubai setzt autonome Kleinstfahrzeuge zur flächigen Überwachung des Stadtgebietes ein.
- Eine weltweite Spezialisierung auf Teilgebiete bzw. technologische Komponenten autonomer Systeme wird langsam sichtbar.
- Die großen Chiphersteller entwickeln spezielle Computing-Komponenten, vor allem für das Hardware-beschleunigte maschinelle Lernen, die für mobile Umgebungen geeignet ist.
- Große IT-Konzerne legen den Fokus auf autonome Systeme und wollen u.a. Betriebssysteme für autonome Fahrzeuge und Systeme bauen. Dabei wird eine enge Verbindung mit dem Smartphone und anderen vernetzten Diensten angestrebt. Sie stellen Cloud- und KI-Frameworks bereit und kooperieren mit den entsprechenden Anwendern.
- Der Bedarf an zuverlässiger Umfelderkennung im Kontext des autonomen Fahrens hat zu massiven Investitionen in Sensorikkomponenten geführt. Hier profilieren sich u.a. auch deutsche Firmen.
- Im Anwendungsfeld autonomes Fahren gibt es Bestrebungen, komplette Baugruppen sowie herstelleroffene Entwicklungsplattformen bereitzustellen.
- In vielen Ländern entstehen Testfelder und Testrecken (Abschnitt 2.6), um Erfahrungen mit autonomen Fahrzeugen zu sammeln, auch dann, wenn in den Ländern keine Hersteller autonomer Fahrzeuge angesiedelt sind.

- Die Skepsis der deutschen Konsumenten gegenüber autonomen Fahrzeugen ab Level 3 oder höher scheint eher zu- als abzunehmen^{45,46}, wohingegen sich Konsumenten in China und auch den USA sehr aufgeschlossen zeigen. Diese Entwicklung könnte längerfristig zu einer Verlagerung der Entwicklungs- und Testarbeiten führen.

Die Auswertungen der Kooperationen und Meldungen zeigen massive Investitionen und eine wachsende Bedeutung amerikanischer IT-Konzerne im Umfeld autonomer Systeme. Auch in Asien werden offenbar große Summen in die Technologieentwicklung investiert. Auffallend ist weiterhin, dass im europäischen Kontext Deutschland eine Führungsrolle bei der industriellen Umsetzung autonomer Systeme und hier des autonomen Fahrens eingenommen hat. Andere Länder richten Testfelder ein, um autonome Fahrzeuge in ihren jeweiligen, spezifischen Umfeldern zu testen, investieren aber offensichtlich erheblich geringere Summen in die Entwicklung einer industriellen Basis, die autonome Systeme und / oder Teiltechnologien entwickeln. Aus der Recherche und den Experteninterviews geht hervor, dass der aktuelle technische Entwicklungsstand in Deutschland zu großen Teilen dem internationalen Entwicklungsstand entspricht.

2.3 Forschungsfelder

Die Zusammensetzung und technische Ausprägung der Komponenten eines autonomen Systems unterscheiden sich je nach Anwendungsgebiet erheblich. Beispielsweise benötigt ein autonomes Planungssystem für Produktionsumgebungen keine Komponenten für die Umgebungserkennung. Submarine Systeme oder Systeme für menschenfeindliche Umgebungen benötigen unter Umständen eine völlig andere Sensorik zur Umfelderkennung als autonome Fahrzeuge, etc. Daher ergeben sich für die verschiedenen Einsatzgebiete unterschiedliche Forschungsfragen, die nur in einem spezifischen Anwendungsfeld relevant sind und die sich entweder gar nicht oder zumindest nicht ohne weiteres auf andere Anwendungsgebiete autonomer Systeme übertragen lassen. Die derzeitige Forschung konzentriert sich in weiten Teilen auf das autonome Fahren. Folgende Forschungsfelder wurden im Rahmen der vorliegenden Studie identifiziert:

- Autonomes Fahren, Logistik
- Autonome Robotik
- Maschinelles Lernen, Computing Plattformen und Infrastrukturen für maschinelles Lernen
- Multiagenten-Systeme, künstliche Intelligenz
- Umgebungserkennung und Sensorik
- Vernetzung und Kommunikation mit umgebender Infrastruktur, Vernetzung mit Cloud Infrastrukturen

⁴⁵ Vgl. ADAC 2016.

⁴⁶ Vgl. Deloitte 2017.

- Simulationstechnologien und Zertifizierungsstrategien für autonome Systeme und ihr Verhalten, Teststrecken für autonomes Fahren
- Akzeptanz durch die Nutzer sowie Interaktion Mensch und autonomes System.

2.4 Öffentliche Förderung

Die Entwicklung autonomer Systeme steht noch am Anfang einer langfristigen Entwicklung. Weil die technologischen Hürden und Investitionen selbst für große Konzerne sehr hoch sind, sowie autonome Systeme Kooperationen von bisher weitgehend getrennten Technologiefeldern und entsprechenden Unternehmen und Institutionen erfordern (Tabelle 1), spielt eine zielgerichtete öffentliche Förderung eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung autonomer Systeme sowie auch bei der Positionierung Deutschlands im weltweiten Wettbewerb. Da autonome Systeme in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt werden können und aus der Kombination der beschriebenen Einzeltechnologien (siehe Abschnitt 1.4) bestehen, profitieren sie auch von Förderprogrammen zu angrenzenden Anwendungsgebieten sowie zu relevanten Teiltechnologien. Dies erlaubt die Verwendung der Ergebnisse aus Themenfeldern, wie z.B. Vernetzung, Digitalisierung, Sensortechnologien, Industrie 4.0, Smart Energy, Smart Data, Smart Services, Smart Home / Building und IT-Security, für die Entwicklung autonomer Systeme.

Zur Beurteilung der aktuellen Förderaktivitäten wurden die nationale Förderdatenbank (<http://www.foerderdatenbank.de>) sowie die Förderdatenbank der europäischen Kommission (http://cordis.europa.eu/search/advanced_en) nach den Stichworten (Deutsch in der nationalen Förderdatenbank bzw. Englisch auf Cordis) autonom, autonomes Fahren, autonome Systeme, autonome Produktionssysteme, Robotik, maschinelles Lernen, künstliche Intelligenz, Selbstlernen und Multiagenten durchsucht. Dabei wurde das Startjahr der Förderaktivitäten auf 2012 gesetzt, weil es davor wenige Einträge zu den genannten Stichwörtern gab. Zusätzlich wurden die entsprechenden Informationsseiten der deutschen Ministerien nach entsprechenden Förderungen durchsucht. Ergänzt wurde die Suche durch Recherchen auf Connected Automated Driving (<https://connectedautomateddriving.eu/research>) sowie für die österreichischen Projekte auf den Seiten des „Infonetz“ (<https://www2.ffg.at/verkehr/projekte.php?lang=de&browse=programm>) mit dem Stichwort „automatisiertes Fahren“. Der integrative Charakter autonomer Systeme erschwert die Beurteilung, ob gefundene Förderprojekte in die Förderstatistik aufgenommen werden sollten oder nicht. Ein Abgrenzungskriterium war die Selbstlernfähigkeit. War in den Kurzbeschreibungen erkennbar, dass „autonom“ oder „intelligent“ den Aspekt des Selbstlernens nicht umfasst, wurde ein Projekt nicht in die Liste der Förderprojekte aufgenommen. Aufgenommen wurden auch Projekte, die erkennbar Methoden, Konzepte und Technologien für autonome Systeme entwickeln, selbst wenn aus dem Projekt selber kein autonomes System entstanden ist bzw. entstehen soll. Zur Beurteilung wurde die Liste der relevanten Forschungsfelder (siehe Abschnitt 2.4) als Beurteilungsgrundlage herangezogen. Dennoch ist eine eindeutige Zuordnung vor allem bei den Förderprojekten zu Industrie 4.0 und Smart Grid kaum möglich, so dass die nachfolgenden Statistiken zwangsweise mit einer Unsicherheit behaftet sind.

Seit den Jahren 2015 und 2016 sind verstärkte Förderaktivitäten auf nationaler und EU-Ebene zu verzeichnen, die autonome Systeme als Gesamtsysteme fördern. Ein Schwerpunkt lag und liegt dabei auf dem autonomen Fahren als gegenwärtige Leitanwendung. Neben der Innovationsförderung ist die öffentliche Hand vor allem bei gesetzlichen Regelungen, der nötigen Infrastruktur, bei Breitbandnetzwerken und entsprechend instrumentierten digitalen Testfeldern sehr stark in die Förderung autonomer Systeme involviert. Auch die deutsche Industrie investiert große Summen in den Aufbau von Kompetenzen im Bereich autonomes Fahren und in entsprechende Forschungslabore. In Tabelle 2 wird eine Auswahl der relevanten Förderprogramme vorgestellt.

Tabelle 2 Überblick über die öffentliche Förderung

Fördergeber	Themen, Projekte, Programme (Auswahl, Stand August 2017)
BMW i	NextGenerationMedia, Vernetzte intelligente Systeme Technologieförderprogramm E-Energy - IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft IKT für Elektromobilität II + III AUTONOMIK für Industrie 4.0 PAiCE Smart Service Welt I + II Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ Das digitale Nutzfahrzeug Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien
BMBF	Neue Hightech Strategie der Bundesregierung Fachforum Autonome Systeme im Hightech Forum (gemeinsam mit BMW i) Plattform „Lernende Systeme“ Autonomes elektrisches Fahren IT-Sicherheit und autonomes Fahren Elektronik für autonomes elektrisches Fahren IKT für Elektromobilität KMU-innovativ: Mensch-Technik-Interaktion, intelligente Mobilität, Digitale Gesellschaft Innovative Mobilitätskonzepte und Vernetzung Autonome, emergente und dynamische IT-Systeme Deutsch-tschechisches Industrie 4.0-Labor Innovationslabore und Kompetenzzentren für Robotersysteme in menschenfeindlichen Umgebungen
BMVI	Forschungsprogramm zur Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr Förderrichtlinie "Automatisiertes und vernetztes Fahren"

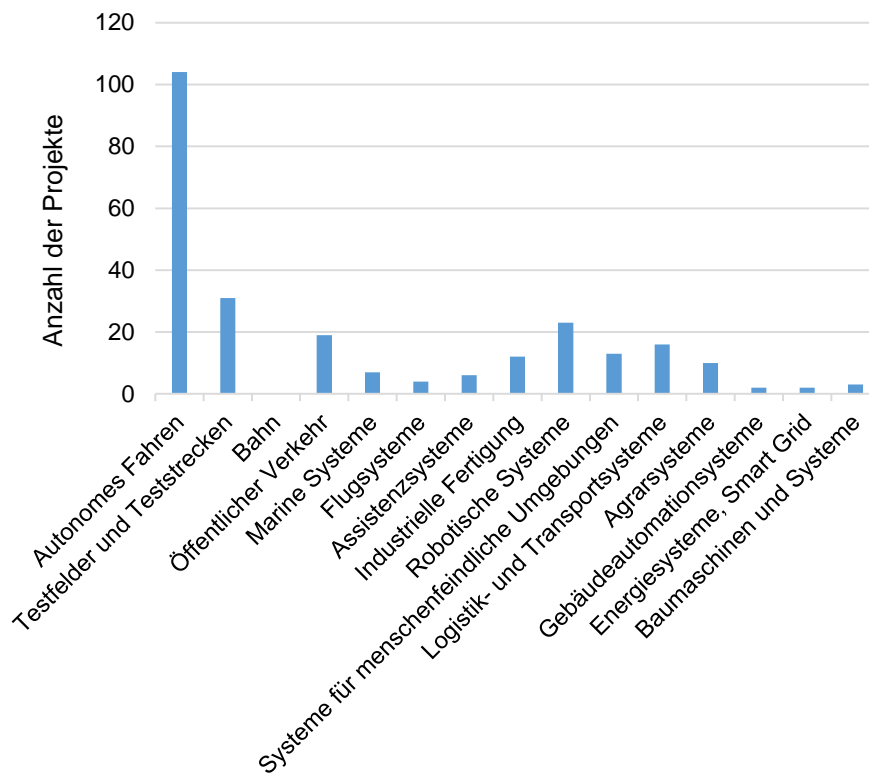
	<p>Förderrichtlinie "Automatisiertes und vernetztes Fahren auf digitalen Testfeldern in Deutschland"</p> <p>Digitale Testfelder in Deutschland</p> <p>Runder Tisch „Automatisiertes Fahren“</p> <p>Ethik-Kommission „Automatisiertes und Vernetztes Fahren“</p> <p>Innovative Hafentechnologien</p>
EU	<p>7. EU-Forschungsrahmenprogramm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Netze, vernetzte Medien und Dienstinfrastrukturen (z.B. "Future Internet", Internet der Dinge, "Cloud Computing", Sicherheit der IKT) • Kognitive Systeme und Robotik (z. B. Funktionalität in Robotersystemen, kognitive Fähigkeiten in komplexen Systemen) • IKT für Unternehmen und Fertigung (z. B. IKT für intelligente Fabriken und Fertigung) • Transport (z.B. Cargo, marine Anwendungen, öffentlicher Verkehr, etc.) <p>Horizon 2020</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coordination of Automated Road Transport Deployment for Europe (Cartre) • Safe and Connected Automation in Road Transport (Scout) • Eine neue Generation von Komponenten und Systemen: Entwicklung von modernen eingebetteten und energie- und ressourceneffizienten Komponenten und Systemen • Neue Generation Computing: Moderne und sichere Rechnersysteme und Technologien, inklusive Cloud-Computing • Zukünftiges Internet: Software, Hardware, Infrastrukturen, Technologien und Dienstleistungen • Moderne Interfaces und Roboter: Robotik und Smart Spaces

Hervorzuheben ist hier das Fachforum Autonome Systeme innerhalb des Hightech Forums, das sich in seiner Arbeit auf die vier wichtigsten Anwendungsfelder für autonome Systeme konzentriert hat.⁴⁷ Dies sind autonomes Fahren, autonome Produktionssysteme, menschenfeindliche Umgebungen und Smart Home/Building. Die Auswertung der Förderdatenbanken hat zusätzliche Anwendungsszenarien ergeben, die sich jedoch in die vier Hauptthemen einordnen lassen. Beispielsweise behandeln die gefundenen Projekte zu Agrartechnologien robotische, landwirtschaftliche Maschinen, die bestimmte Arbeitsschritte selbstständig erledigen können. Energiesysteme und Smart Grid lassen sich in den Bereich Smart Building und Smart Home einordnen.

Zur Identifizierung der aktuellen Förderschwerpunkte wurden die gefundenen Projekte Themenfeldern zugeordnet. Die Abbildung 4 zeigt die gefundenen Förderaktivitäten nach Themen.

⁴⁷ Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017

Abbildung 4 Zuordnung der gefundenen Projekte zu Themenfeldern



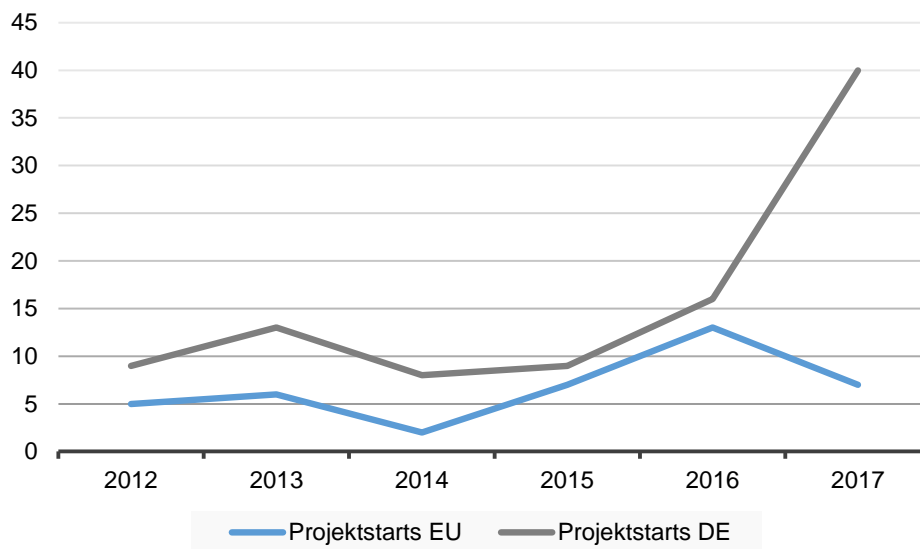
(Quelle: Förderdatenbank, Cordis, Connected automated driving, Infonetz; Auswertung durch acatech, DFKI, IEM)

Bei der Auswertung waren Mehrfachnennungen möglich. Beispielsweise wurden Projekte, die Testfelder für autonomes Fahren zum Thema haben, zusätzlich auch dem Thema autonomes Fahren zugeordnet. Es zeigen sich der starke Schwerpunkt auf dem autonomen Fahren aber auch weitere Schwerpunkte rund um robotische Systeme. Auffallend ist, dass es im Bereich autonomer Gebäude nur ein Projekt gibt. In den Abbildungen wird eine starke Förderaktivität im Themenumfeld des autonomen Fahrens deutlich. Weitere maßgeblich geförderte Themengebiete sind die Robotik sowie die industrielle Fertigung. Andere Anwendungsgebiete, die bezogen auf ihr Marktpotenzial⁴⁸ ebenfalls relevant sind, werden derzeit erheblich weniger oder gar nicht gefördert. Die Recherchen zu der vorliegenden Studie zeigen speziell beim autonomen Fahren neben der öffentlichen Förderung auch eine umfangreiche Forschungstätigkeit in der Industrie.

In Abbildung 5 wird die Anzahl der gestarteten Projekte mit Bezug zu autonomen Systemen im Verlauf von 2012 bis 2017 dargestellt. Die zeitliche Einordnung erfolgte anhand des Förderbeginns. Berücksichtigt wurden Verbundprojekte, die in den meisten Fällen eine Laufzeit von zwei bis drei Jahren aufweisen.

⁴⁸ Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017

Abbildung 5 Projektstarts EU und Deutschland



(Quelle: Förderdatenbank, Cordis, Connected automated driving, Infonetx; Auswertung durch DFKI)

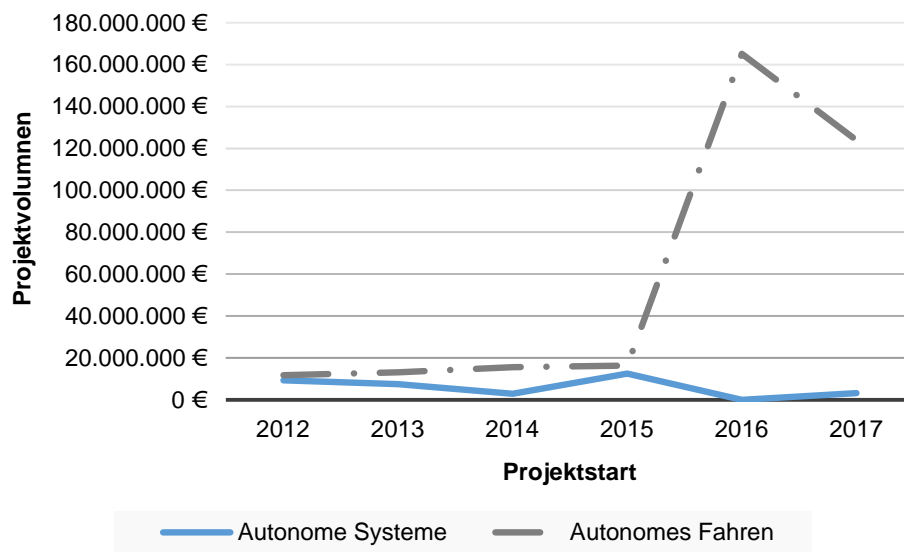
Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass in vielen europäischen Projekten auch deutsche Partner Teil der Konsortien waren bzw. sind. Auffallend ist ein starker Anstieg der Projektaktivitäten ab dem Jahr 2015, der in 2016 und 2017 nochmals verstärkt wurde.

Mit der Anzahl der geförderten Projekte steigt auch das Projektvolumen stark an. Besonders stark fällt die Förderung des autonomen Fahrens auf EU-Ebene ins Gewicht (Abbildung 6). Der Anstieg des Projektvolumens zum autonomen Fahren ist auch in deutschen Projekten sichtbar, jedoch werden auch andere Themen autonomer Systeme gefördert (Abbildung 7). Auch hier ist ab 2015 ein starker Anstieg der Anzahl von geförderten Projekten zu beobachten, der in 2017 durch die umfassenden Förderaktivitäten des BMVI nochmals verstärkt wurde.

Der Förderschwerpunkt autonomes Fahren wird auch in den Anteilen des autonomen Fahrens an der Gesamtförderung autonomer Systeme sichtbar. In Deutschland ist der Schwerpunkt nicht ganz so ausgeprägt wie auf EU-Ebene (Abbildung 8 und 9).

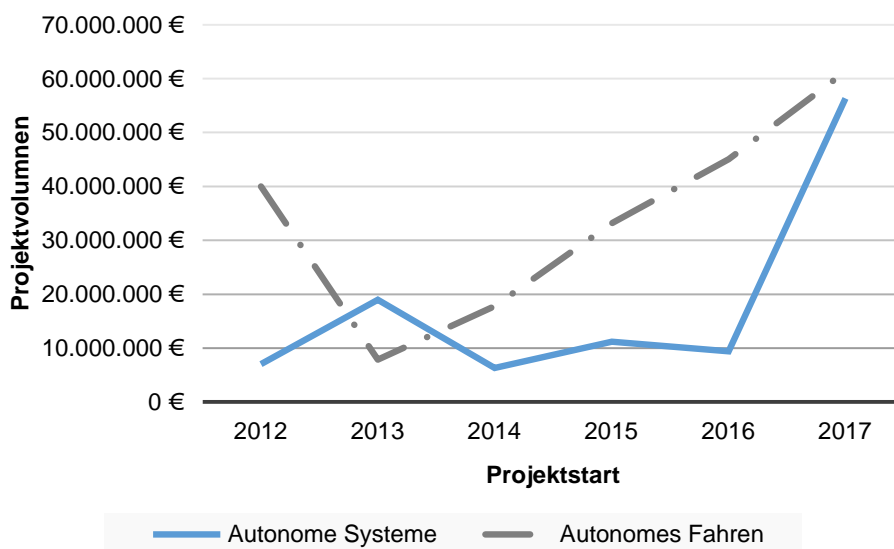
Bei der Bewertung der Fördervolumina sowie auch der Anteile des autonomen Fahrens an der Förderung ist zu berücksichtigen, dass weitere Förderprogramme auf nationaler und europäischer Ebene existieren, die für alle autonome Systeme wichtige Technologiebereiche abdecken. Hierzu gehören zahlreiche Projekte z.B. im Bereich Industrie 4.0, Internet der Dinge, Smart Grid, Smart Home sowie im Bereich 5G-Mobilfunk, die die Interoperabilität und die performante Vernetzung verschiedenster Systeme aus den jeweiligen Anwendungsdomänen ermöglichen. Diese teilweise sehr umfassenden Förderprogramme haben dazu beigetragen, wesentliche technologische Grundlagen für autonome Systeme zu legen, sind jedoch nicht in die vorstehende Auswertung eingeflossen, da sie sich nicht mit autonomen Systemen beschäftigen.

Abbildung 6 Projektvolumen EU-Projekte nach Startjahren



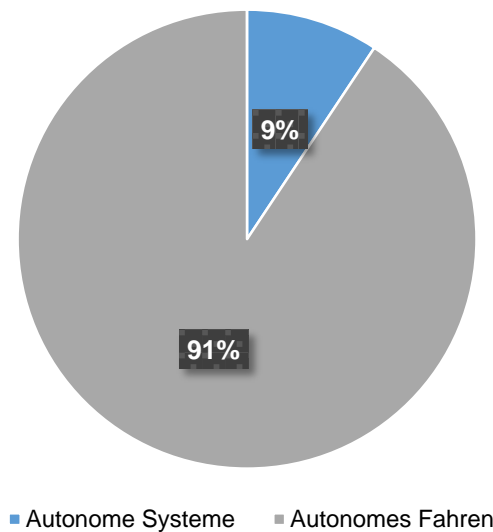
(Quelle: Förderdatenbank, Cordis, Connected automated driving, Infonetz; Auswertung durch acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 7 Projektvolumen deutscher Projekte nach Startjahren



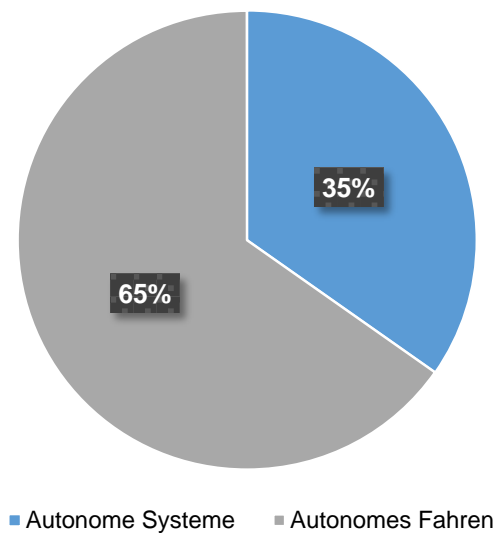
(Quelle: Förderdatenbank, Cordis, Connected automated driving, Infonetz; Auswertung durch acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 8 Anteil autonomes Fahren am Projektvolumen der EU-Projekte 2012 bis 2017



(Quelle: Förderdatenbank, Cordis, Connected automated driving, Infonetz; Auswertung durch acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 9 Anteil autonomes Fahren am Projektvolumen deutscher Projekte 2012 bis 2017



(Quelle: Förderdatenbank, Cordis, Connected automated driving, Infonetz; Auswertung durch acatech, DFKI, IEM)

2.5 Testfelder und Teststrecken

Im Bereich des autonomen Fahrens sind weltweit zahlreiche Testfelder entstanden bzw. werden gerade eingerichtet. Sie dienen der Erprobung von Fahrsituationen sowie der Entwicklung von Verfahren zur Kommunikation des Fahrzeugs mit der erforderlichen Verkehrsweginfrastruktur. Ebenso werden die jeweiligen, landestypischen Besonderheiten der Standorte mit Bezug zum autonomen Fahren untersucht. Je nach Aufgabenstellung sind einige – aber nicht alle – Testfelder umfangreich instrumentiert, um die Kommunikation der autonomen Fahrzeuge mit der Infrastruktur zu erproben.

In Deutschland befinden sich (bzw. sind geplant) Testfelder in den Städten Berlin, Braunschweig, Dresden, Düsseldorf, Hamburg, Ingolstadt, München und im Ruhrgebiet sowie die digitalen Testfelder auf der Autobahn A9 und A93, sowie der A2, A7 und A39. Ein weiteres digitales, grenzüberschreitendes Testfeld Deutschland-Frankreich befindet sich in Merzig. Auf europäischer Ebene werden teilweise großflächige, europaweite Testfahrten mit autonomen Fahrzeugen durchgeführt. Darunter befindet sich auch ein Testfeld in arktischer Region. Ebenso sind zahlreiche Testfelder in städtischen Gebieten, wie z.B. in Helsinki, vorhanden oder geplant. In Großbritannien existieren Testfelder in den Städten Greenwich, Milton Keynes, Coventry und Bristol.

Zusätzlich gibt es Testfelder für die Erprobung des öffentlichen Nahverkehrs. Der autonome Kleinbus „Olli“ fährt beispielsweise u.a. auf dem Euf-Campus in Berlin und der Charité. Ein weiteres Testfeld für „Olli“ befindet sich in Bad Birnbach.

In den USA gibt es u.a. das Testgelände „Ford Mcity“, den Interstate 380 sowie in der Stadt Portland. Kalifornien erlaubt seit kurzem umfangreiche Testfahrten auf öffentlichen Straßen mit autonomen Fahrzeugen. Auch in Asien gibt es mehrere Testfelder in Tokio, Singapur sowie das Baidu Testfeld Anhui in China. Weitere sind geplant.

2.6 Regulierungsaktivitäten

Im Folgenden werden exemplarisch Regulierungsaktivitäten im Bereich autonome Systeme in den Ländern vorgestellt, die in diesem Feld stark investieren und Forschung betreiben. Dazu zählen die USA, Japan, Israel, China, Südkorea, Deutschland und die EU. Entsprechend der Verfügbarkeit von Informationen richtet sich der Fokus dabei auf die Einrichtung von Testfeldern oder -strecken, sowie auf den Umgang mit Haftungsfragen, Versicherung und Registrierung. Des Weiteren werden, wo verfügbar, Hinweise auf Klärung ethischer Fragestellungen gegeben.

2.6.1 USA

Ausgangspunkt: In den USA besteht ein sehr hoher Entwicklungsstand, der besonders durch die Unternehmen des Silicon Valley, Universitäten und Forschungseinrichtungen hervorgeht.⁴⁹ Die steigenden Absatzzahlen von autonomen Systemen sind dabei vorrangig auf den Trend der au-

⁴⁹ Vgl. Fraunhofer IAO/Horváth&Partners 2016.

tomatisierten und intelligenten Produktion zurückzuführen.⁵⁰ Zudem gibt es eine umfassende staatliche F&E Förderung und im Vergleich zu Deutschland weniger restriktive rechtliche Rahmenbedingungen.⁵¹ Diese Rahmenbedingungen unterscheiden sich zwischen den einzelnen Bundesstaaten. Im Bereich automatisiertes Fahren gilt Kalifornien weltweit als Vorreiter, knapp 40 Unternehmen sind derzeit berechtigt, autonome Autos bis zur Stufe 5 auf öffentlichen Straßen in Kalifornien zu testen.⁵² Auch in der Landwirtschaft befinden autonome Fahrzeuge, wie z.B. Multi-Fahrzeug-Systeme mit Schwarmintelligenz sich bereits in der Anwendung.⁵³

Regulierungsaktivitäten: Das US Department of Transportation (DOT) und die NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) haben 2016 Leitlinien als „Federal Automated Vehicles Policy“ für das Testen von automatisierten Fahrzeugen hervorgebracht⁵⁴. Dieses enthält Regelungen für einzelne Staaten, sowie die sogenannte „Vehicle Performance Guidance for Automated Vehicles“ für die sichere Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr.

Zulassungsfragen werden von den Staaten eigenständig geregelt. In Kalifornien legt der California Vehicle Code Anforderungen an die Versicherungen fest. Hersteller benötigen für das Testen selbstfahrender Autos auf öffentlichen Straßen eine Erlaubnis. Diese wird ausgestellt, wenn alle Anforderungen, die im California Code of Regulations und California Vehicle Code geregelt sind, erfüllt werden.⁵⁵ Die Straßenverkehrsbehörde NHTSA erklärte jedoch, dass die Zulassung selbstfahrender Fahrzeuge beschleunigt werden müsse, indem klare und staatenübergreifend einheitliche Regeln und Anforderungen geschaffen werden müssen.⁵⁶

Initiativen: An der Stanford Universität wird eine 100-jährige Studie zu KI durchgeführt mit dem Kürzel „AI100“, in der verschiedene Aspekte von KI und deren Einfluss auf verschiedene Bereiche des Lebens untersucht werden. Neben rechtlichen Fragen geht es dabei um wirtschafts- und regierungspolitische Angelegenheiten, Sicherheitsfragen und Neurowissenschaften.⁵⁷

In den USA gibt es zudem seit 2011 eine „National Robotics Initiative“, die das Ziel hat, die Entwicklung und Nutzung von Robotern in den Staaten zu beschleunigen, die mit und neben Menschen arbeiten.⁵⁸ Die Initiative wird unterstützt durch verschiedene Einrichtungen, wie die National Science Foundation (NSF), der NASA, dem National Institutes of Health (NIH) und dem US Department of Agriculture (USDA).⁵⁹ Grundlage für die Errichtung der Initiative war die Robotics Roadmap, die von verschiedenen Universitäten durchgeführt wurde.

⁵⁰ Vgl. IFR 2015.

⁵¹ Vgl. Gao et. al. 2016.

⁵² Vgl. DMV Kalifornien 2017a; Harris 2017.

⁵³ Vgl. Ziegler 2015.

⁵⁴ Vgl. DOT/NHTSA 2016.

⁵⁵ Vgl. Vellinga 2017.

⁵⁶ Vgl. Hecking 2016.

⁵⁷ Vgl. Stanford University 2017.

⁵⁸ Vgl. Douglas 2017.

⁵⁹ Vgl. NSF 2017.

2.6.2 Japan

Ausgangspunkt: Im Jahr 2015 legte die japanische Regierung eine über fünf Jahre angelegte Strategie vor, die sowohl Entwicklung als auch Anwendung der Robotertechnologie fördern soll. Die Industrieinitiative der Strategie orientiert sich dabei eng am deutschen Vorbild Industrie 4.0. Mit der „Japan Robot Strategy“⁶⁰ wird das Ziel geäußert, Roboter in den Bereichen Fertigung, Agrarwirtschaft, Logistik, Bauwesen und Pflege vermehrt zu etablieren und dabei eine führende Rolle einzunehmen. In der Strategie wird auch besonders auf die Rolle der Arbeitnehmer und den Bedarf an Arbeitskräften mit Know-How zu autonomen Systemen eingegangen. Japan kündigte an, hierbei besonders auf On-the-job-Trainings zu setzen.⁶¹ Zur Unterstützung dieses Vorhabens wurde der „Robot Revolution Initiative Council“ in Tokio gegründet, bei dem eine explizite Kooperation mit Deutschland beschlossen wurde. Das japanische Pendant zur Plattform Industrie 4.0 nennt sich „Industrial Value Chain Initiative“, ein japanisches Konsortium aus Wirtschaft und Wissenschaft.⁶²

Regulierungsaktivitäten: Mit der „Japan Robot Strategy“ gibt das japanische Wirtschaftsministerium (METI) einen ersten rechtlichen Rahmen für die effiziente Weiterentwicklung von Robotik vor. Dabei werden Sicherheitsstandards für den Verbraucher der Entwicklung angepasst und neue gesetzliche Regelungen für Unfälle in Betracht gezogen. Derzeit verfügt Japan über ein Produkthaftungsgesetz, das eine verschuldensabhängige Haftung des Herstellers für Schäden durch fehlerhafte Produkte vorsieht.⁶³ Die japanische Regierung äußerte zudem das Ziel, bis zur in Japan stattfindenden Olympiade 2020 vollautonome Autos auf Tokios Straßen zu bringen.⁶⁴ Zum Testen sollen spezielle Zonen ernannt werden, in denen es keine Regulierung für autonome Fahrzeuge gibt, um die Entwicklung nicht auszubremsen. Dadurch sollen besonders die ansässigen Unternehmen zu weiteren Investitionen bewegt werden.⁶⁵

Initiativen: Im Jahr 2017 wurden die „ROBOLAW.ASIA“ Initiativen als interdisziplinäres Forschungsprojekt u.a. vom japanischen Wirtschaftsministerium und der Tohoku Universität sowie dem „Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences“ gegründet. Diese hat das Ziel, die Schnittstellen von Anwendungen Künstlicher Intelligenz und den regulativen Rahmenbedingungen zu untersuchen. Auch Fragen nach gesellschaftlicher Akzeptanz werden betrachtet.⁶⁶ Da besonders das Thema automatisiertes Fahren eine sehr hohe Priorität in der japanischen Industrie- und Technologiepolitik hält, gibt es auch hier unterschiedliche Förderprogramme und Initiativen, wie z.B. im Rahmen des „Cross-Ministerial Strategic Innovation Promotion Programme“, in dem der Fokus auf der Forschung und Entwicklung von Informations- und Telekommunikationsinfrastruktur liegt.

⁶⁰ Vgl. Headquarters for Japan's Economic Revitalization 2015.

⁶¹ Vgl. Headquarters for Japan's Economic Revitalization 2015, S. 38-40.

⁶² Vgl. Kooperation International 2015; Headquarters for Japan's Economic Revitalization 2015.

⁶³ Vgl. Lemmer 2016.

⁶⁴ Vgl. Vogt 2016.

⁶⁵ Vgl. Nikkei 2016.

⁶⁶ Vgl. ROBOLAW.ASIA Initiative 2017.

2.6.3 Israel

Ausgangspunkt: Israel gilt als Führungsland im Bereich Landwirtschafts- und Militärroboter und beheimatet eine Vielzahl von Unternehmen, die Robotiklösungen auf den Markt bringen.⁶⁷ Das Land veranschaulicht zudem in einzigartiger Weise, wie sich ein digitales Ökosystem Mobilität in vielfältiger und dynamischer Weise entwickeln kann. Israel beheimatet zahlreiche Start-Ups, die besonders neue Entwicklungen für autonomes Fahren vorantreiben. Ein Beispiel hierfür ist die israelische Firma Mobileye, die Technologien für autonomes Fahren entwickelt, beispielsweise ein kamerabasiertes Advanced Driver Assistance System (ADAS), das als Unfallpräventionssystem fungiert.⁶⁸ Mobileye, die 2017 von Intel gekauft wurden, arbeiten zusammen mit BMW daran, 2021 das erste autonome Auto der Stufe 5 auf den Markt zu bringen.⁶⁹

Regulierungsaktivitäten: Israel, als der weltweit größte Drohnen-Exporteur sowie Führungsland im Bereich Militärrobotik entscheidet über die Regulierung weitestgehend unabhängig. Ende 2016 weigerte sich das Land, ein Abkommen der USA zu unterzeichnen, welches die Nutzung und den Export von bewaffneten Drohnen regulieren soll.⁷⁰

Initiativen: Die israelische Regierung beabsichtigt, ab 2020 besondere Autobahnfahrspuren für autonome Fahrzeuge freizugeben, und 2040 nur noch entsprechende Fahrzeuge zuzulassen. Der Verkehrsminister erklärte 2016, ein FuE-Zentrum für autonomes Fahren und intelligente Verkehrssysteme rund 30 km entfernt von Tel Aviv zu eröffnen. Das Zentrum soll u.a. eine Fahrstrecke von 1 km, Gebäudeattrappen, Fußgängerübergänge sowie verschiedene Fahrbedingungen aufweisen.⁷¹

2.6.4 China

Ausgangspunkt: Seit 2013 ist China der weltweit größte Markt für Robotik mit einem kontinuierlichen Wachstum. Im Jahr 2015 wurden dort 68.600 Roboter verkauft (im Vergleich zu Gesamteuropa mit 50.100 verkauften Systemen im gleichen Jahr).⁷² Auch auf dem Käuferranking besetzt China mit 27% der weltweit verkauften Roboter den ersten Platz. Aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte liegt China jedoch mit 49 Robotern auf 10.000 Arbeitern noch unter dem globalen Durchschnitt von 66 Robotern.⁷³

Besonders der Produktionssektor Chinas wird sich in Zukunft verändern. Bedingt durch den demografischen Wandel sowie steigende Arbeitskosten wird das Thema Automatisierung strategisch vorangetrieben.

⁶⁷ Vgl. Prakash 2016.

⁶⁸ Vgl. Lemmer 2016, S. 45; dpa 2017.

⁶⁹ Vgl. Beeger 2017.

⁷⁰ Vgl. RT 2016.

⁷¹ Vgl. GTAI 2016.

⁷² Vgl. IFR 2015.

⁷³ Vgl. Yang 2017.

Die Förderung im Rahmen des 10-Jahres Programms „Made in China 2025“ durch die chinesische Regierung ist größtenteils industriepolitisch motiviert.⁷⁴ Auch aufgrund der großen Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber technischen Innovationen, insbesondere im Bereich autonomes Fahren, ist durchaus zu erwarten, dass China Wachstumstreiber bleibt. Die Herstellung von Interoperabilität durch Standards und Normen wird ein wichtiger Faktor für China sein, sich auch auf dem internationalen Markt langfristig zu positionieren.

Regulierungsaktivitäten: Die Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen steht bereits auf der politischen Agenda, wie z.B. beim Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). Da China aber zumindest mit Blick auf Automatisierung im Verkehr keine relevanten völkerrechtlichen Abkommen unterzeichnet hat, sind die Hürden einer rechtlichen Anpassung voraussichtlich gering.⁷⁵

Initiativen: Im Jahr 2015 stellte die Regierung das nationale Rahmenprogramm „Made in China 2025“ vor. China will sich damit als Treiber für Innovation und Qualität in zahlreichen Sektoren positionieren.⁷⁶ Im Automotive-Bereich treiben das Ministerium für Industrie und Informationstechnologie sowie das Verkehrsministerium Themen wie Automatisierung und Vernetzung voran. Ein konkretes Ziel ist hierbei, die Markteinführung autonomer Fahrzeuge zwischen 2021 und 2025 zu vollziehen. Bis 2030 sollen autonome Fahrzeuge dann zum Standard in China werden.⁷⁷

Im Dezember 2016 veröffentlichte die chinesische Regierung zudem einen 5-Jahres Plan („Development Plan for Intelligent Manufacturing Equipment Industry“). Dieser umfasst neben dem nationalen Ziel, die Verkaufszahlen für industrielle Roboter bis 2020 zu verzehnfachen⁷⁸, das Vorhaben, Chinas Wettbewerbsfähigkeit als „Factory of the World“ zu vergrößern.⁷⁹

2.6.5 Südkorea

Ausgangspunkt: Der koreanische Markt gehört neben dem von Singapur, Japan und Deutschland zu den Märkten mit dem höchsten Automatisierungsgrad. Südkorea weist mit 531 Robotern pro 10.000 Arbeitskräfte die höchste Roboterichte in der Fertigungsindustrie auf.⁸⁰ Grundsätzlich ist Südkorea der Einführung und Erprobung neuer autonomer Systeme sehr offen gegenüber eingestellt. Das Land ist weltweit das Erste, in dem überall autonome Fahrzeuge getestet werden dürfen. Eine großangelegte Deregulierung wurde seitens der Regierung verordnet, die u.a. die Erklärung des gesamten Landes als Teststrecke für automatisierte Fahrzeuge als auch eine Lockerung der Regulierungen bezüglich des Einsatzes von Drohnen beinhaltet. In diesem Kontext

⁷⁴ Vgl. Meissner/ Wübbecke 2016.

⁷⁵ Vgl. Lemmer 2016.

⁷⁶ Vgl. Wübbecke 2015.

⁷⁷ Vgl. Reuters 2016.

⁷⁸ Vgl. Headquarters for Japan's Economic Revitalization 2015, S. 4.

⁷⁹ Vgl. Huaxia 2016.

⁸⁰ Vgl. IFR 2015.

fördert die Regierung auch Big-Data-Anwendungen und satellitenbasierte Positionsbestimmung in ausgewählten Branchen⁸¹.

Regulierungsaktivitäten: In Südkorea ist das Ministry of Knowledge Economy (MKE) verantwortlich für die Gesetzgebung und Regulierungsaktivitäten von autonomen Systemen. Korea hat bereits 2007 eine „Robot Ethics Charta“ und 2008 eine „Intelligent Robot Development and Supply Promotion Act (IRDSPA)“⁸² vorgestellt. Die „Ethics Charta“ hat dabei das Ziel, Regelungen für die Co-Existenz von Menschen und Robotern zu schaffen. Der Fokus liegt dabei jedoch nicht darauf, wie moralisch künftige Roboter handeln sollen, sondern auf Vorschriften, die beim Bau von Robotern beachtet werden sollen. Die IRDSPA behandelt hingegen Regelungen für die Robotik-Industrie und die Forderung an die Regierung, alle 5 Jahre einen Basisplan für die Entwicklung und den Vertrieb von intelligenten Robotern zu erstellen.⁸³ Auf Basis des IRDSPA wurde 2010 das koreanische „Robot Industry Promotion Institute (KRIA)“ errichtet, dessen Agenda neben der Umsetzung der Charta die weitere Entwicklung und Unterstützung von Richtlinien für die Robotik-Industrie beinhaltet.^{84 85}

Initiativen: Im Wettbewerb um das Testen von autonomen Fahrzeugen nimmt Südkorea einen der führenden Plätze ein. Im Oktober 2017 wird in der Nähe der Stadt Hwaseong das weltweit größte Testgelände für selbstfahrende Autos, die K-City, eröffnet. Sowohl koreanische Autobauer, wie Kia oder Hyundai, als auch Technologiefirmen, wie Samsung oder SK Telecom, können auf dem Testparcours ohne Zulassung automatisierte Fahrzeuge erproben. Die Regierung erteilte zudem einzelnen Firmen wie Samsung die Erlaubnis, ihre Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen zu testen. Ein konkretes Ziel der koreanischen Regierung ist es, ab 2020 eine große Anzahl automatisierter Autos der Stufe 3 auf den öffentlichen Straßen zu haben.⁸⁶

2.6.6 Deutschland

Ausgangspunkt: In Europa verfügt Deutschland über den größten Markt für Robotik, weltweit ist Deutschland an fünfter Stelle positioniert. Ähnlich wie in den asiatischen Ländern mit einer alternden Gesellschaft werden auch hierzulande hohe Wachstumsraten für den Einsatz autonomer Systeme, beispielsweise für Assistenzfunktionen im Smart Home Bereich oder in der Pflege, erwartet.⁸⁷ Zudem gilt Deutschland besonders im Bereich der Mobilität als Vorreiter bei der Entwicklung und Markteinführung von automatisierten Fahrzeugfunktionen, welche z.T. bereits heute schon in Serienfahrzeugen deutscher Hersteller verfügbar sind.⁸⁸ Im Sektor der Fertigungsindustrie ist Deutschland mit der Initiative „Industrie 4.0“ ein Vorbild für andere Nationen.

⁸¹ Vgl. Autonomes-Fahren.de 2016b.

⁸² Vgl. KLRI 2017.

⁸³ Vgl. KLRI 2017.

⁸⁴ Vgl. KIRIA 2016.

⁸⁵ Vgl. Cole 2012.

⁸⁶ Vgl. Plass-Fleßenkämper 2017.

⁸⁷ Vgl. IFR 2015.

⁸⁸ Vgl. Lemmer 2016.

Regulierungsaktivitäten: Nach der 2016 in Kraft getretenen Änderung des Wiener Übereinkommens hinsichtlich technischer Vorschriften für automatisierte Fahrsysteme wurde 2017 auch eine Änderung im deutschen Straßenverkehrsgesetz vom Bundestag und Bundesrat angenommen. Demnach dürfen künftig auch Autos der Stufe 3 und 4 (hoch- und vollautomatisiert) auf deutschen Straßen fahren. Die letzte Verantwortung bleibt jedoch nach wie vor beim Menschen selbst. Zur Klärung der Schuldfrage bei einem Unfall soll eine Blackbox in die Fahrzeuge eingebaut werden, damit der Fahrer sich nicht pauschal auf ein Versagen des Systems berufen kann.⁸⁹ Damit autonome Fahrfunktionen jedoch gänzlich zugelassen werden können, bedarf es noch einer Änderung der internationalen UN/ECE-Regelung Nr. 79, die autonome Lenkanlagen bislang ausschließt.⁹⁰ In Bezug auf Servicerobotik sind keine Regulierungsaktivitäten auf nationaler Ebene bekannt.

Initiativen: Nachdem das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2014 den Runden Tisch „Automatisiertes Fahren“ ins Leben gerufen hat, wurde 2015 die „Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren“ beschlossen. Deutschland soll sich demnach zum Leitanbieter für automatisierte und vernetzte Fahrzeuge entwickeln. Derzeit gibt es bislang 7 Testfelder für automatisierte Fahrzeuge. Das bekannteste ist das „digitale Testfeld Autobahn“ auf der A9, welches mit Sensorik-Anlagen ausgestattet ist. Im Jahr 2017 hat die vom BMVI berufene Ethik-Kommission für Automatisiertes und Vernetztes Fahren einen Bericht vorgelegt, in dem ethische Leitlinien für den automatisierten Straßenverkehr enthalten sind.⁹¹

2.6.7 Europäische Union

Ausgangspunkt: Bislang hat keines der europäischen Länder umfassende gesetzliche Regelungen für autonome Systeme eingeführt.⁹² Vor dem Hintergrund der steigenden Wachstumsrate autonomer Systeme im europäischen Raum forderten die Abgeordneten des Europäischen Parlaments im Februar 2017 die EU-Kommission auf, Regeln für Robotik und Künstliche Intelligenz vorzulegen und äußerten dabei einen dringenden Handlungsbedarf für gemeinsame europäische zivilrechtliche Regelungen.⁹³ Im Rahmen der Empfehlung wird zudem auch ein ethischer Verhaltenskodex angefügt, der auf freiwilliger Basis gelten soll. Der Kodex enthält ethische Standards für Forscher, Nutzer und Konstrukteure sowie Lösungsansätze für ethische Dilemmata.⁹⁴ Auch für den Bereich der Mobilität ist die EU noch auf keine Schlussbestimmung für z.B. Haftungs- und Sicherheitsfragen gekommen.⁹⁵ Die EU-Staaten haben sich jedoch durch die Amsterdamer Erklärung 2016 dazu verpflichtet, bis 2019 eine gemeinsame Regelung für den intelligenten Straßenverkehr zu erarbeiten.⁹⁶

⁸⁹ Vgl. Bundesregierung 2017.

⁹⁰ Vgl. GSK 2017.

⁹¹ Vgl. Herger 2017.

⁹² Vgl. Deutscher Bundestag 2016.

⁹³ Vgl. Europäisches Parlament 2017.

⁹⁴ Vgl. Europäisches Parlament 2017.

⁹⁵ Vgl. Weinrich 2016.

⁹⁶ Vgl. Autonomes-Fahren.de 2016a.

Regulierungsaktivitäten: Im März 2014 wurde mit der Erweiterung des Wiener Übereinkommens der erste Schritt in Richtung des intelligenten Straßenverkehrs getan. Der neu eingeführte Artikel 8 Abs. 5b sieht vor, dass Fahrzeugsysteme, welche die Fahrzeugführung beeinflussen, dann zulässig sind, wenn der Fahrzeugführer diese durch manuelle Eingriffe jederzeit übersteuern oder ausschalten kann. Die Stufe 5, also das fahrerlose Fahren bleibt dadurch jedoch weiterhin rechtlich ausgeschlossen. Weiterhin bedarf es nun auch einer Änderung des UNECE Nr. 79, der bisher automatisierte Lenksysteme bei über 10 km/h nicht erlaubt.⁹⁷

Initiativen: Von 2012 bis 2014 befasste sich ein von der Europäischen Kommission mit 1,9 Mio. \$ gefördertes Projekt „Robolaw“ umfassend mit den rechtlichen Herausforderungen für Servicerobotik. Hierbei wurden verschiedene Aspekte zu Sicherheits-, Haftungs- und Datenschutzfragen herausgearbeitet.⁹⁸

Einige europäische Parlamentsabgeordnete forderten die Kommission daraufhin dazu auf, einen wirksamen Überwachungsmechanismus mit einheitlichen Kriterien für alle Mitgliedsstaaten zu entwerfen, um sicher Experimente mit autonomen Systemen durchführen zu können.⁹⁹ Weitere Überlegungen drehen sich um die Schaffung einer neuen Rechtskategorie für Roboter¹⁰⁰, ein umfassendes EU-Registrierungssystem mit einheitlichen Einstufungskriterien für Roboter, sowie die Errichtung einer Europäischen Agentur für Robotik und KI.¹⁰¹ Ab 2018 gilt innerhalb der EU das neue Datenschutzgesetz, das auch den Rahmen für das Design und die Entwicklung von Anwendungen vorgibt, die auf personenbezogene Daten zurückgreifen.

⁹⁷ Vgl. Lemmer 2916, S. 79.

⁹⁸ Vgl. Deutscher Bundestag 2016, S. 8-9.

⁹⁹ Vgl. Europäisches Parlament 2017, S. 12.

¹⁰⁰ Vgl. Europäisches Parlament 2017, S. 5-6.

¹⁰¹ Vgl. Europäisches Parlament 2017, S. 10.

3 Stärken und Schwächen des deutschen Wissenschafts- und Innovationsstandorts

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde der Entwicklungsstand in den für autonome Systeme relevanten Technologiebereichen und Querschnittsthemen erhoben. Diese Bewertung erfolgte mit Fokus auf den Entwicklungsstand in Deutschland und im internationalen Vergleich. Ziel war eine Identifikation der Stärken und Schwächen sowie der Chancen und Risiken für Deutschland auf dem Gebiet der autonomen Systeme. Auf Basis dieser Ergebnisse werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, die beispielsweise bei der Gestaltung von Forschungsförderungsprogrammen berücksichtigt werden können.

Die Bewertung erfolgte auf Basis eines Online-Fragebogens, der von deutschen und internationalen Experten aus Wissenschaft und Industrie beantwortet wurde. Der Fragebogen gliedert sich in drei Abschnitte:

1. Teil: Allgemeine Bewertung des internationalen Entwicklungsstands autonomer Systeme in den einzelnen Anwendungsbereichen.
2. Teil: Bewertung des Entwicklungsstands der einzelnen Technologiebereiche und der Querschnittsthemen mit Hilfe einer sechsstufigen, endpunktbenannten Skala.
3. Teil: Fragen zu Unternehmen bzw. Organisation der teilnehmenden Experten im Kontext autonome Systeme (z.B. relevante Anwendungsfelder).

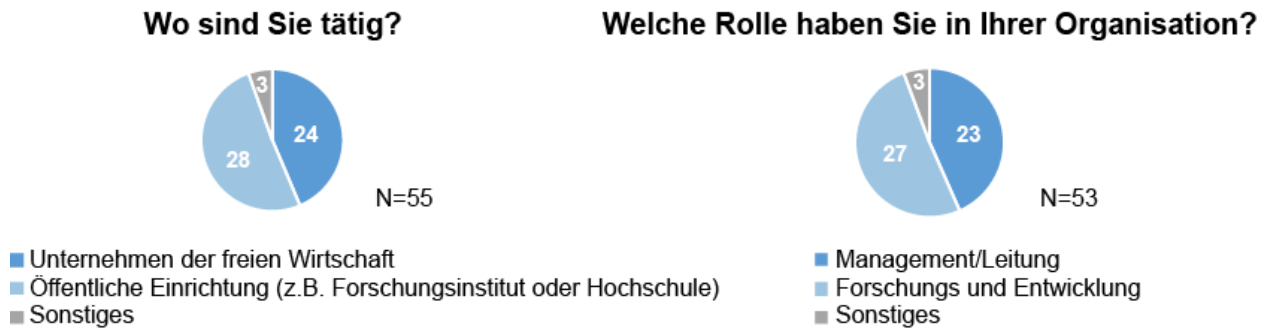
Insgesamt nahmen an der Online-Umfrage 66 Experten teil, davon 36 aus Deutschland. Die Verteilung der Experten aus Industrie und Forschung, sowie die Rolle der Experten in ihrer jeweiligen Organisation sind in Abbildung 10 gezeigt. Für die Studie sollten Experten in unterschiedlichen Rollen und aus allen relevanten Anwendungsbereichen befragt werden. Insgesamt sind die Befragten relativ gleichmäßig auf die jeweiligen Organisationsformen und Rollen verteilt und alle betrachteten Anwendungsbereiche sind abgedeckt (Abbildung 11), wobei ein Großteil der Experten in den Anwendungsbereichen industrielle Produktion und Mobilität tätig sind.

Im Anschluss an die Online-Befragung wurden tiefergehende Einzelinterviews mit ausgewählten Experten durchgeführt, um erste Beobachtungen aus der Online-Befragung zu diskutieren und detailliertere Einschätzungen zu bestimmten Themen einzuholen. Ebenfalls wurde ein Expertenworkshop veranstaltet, bei dem die auf Basis der Online-Umfrage und den Interviews identifizierten Stärken und Schwächen kritisch durch die Teilnehmer hinterfragt und ergänzt wurden.

3.1 Ergebnisse der Expertenbefragung

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Online-Befragung vorgestellt. Neben der statistischen Auswertung wurden auch Kommentare aus den Fragebögen sowie die Expertenmeinungen aus den Interviews berücksichtigt, um die Ergebnisse zu erläutern und Beobachtungen zu formulieren.

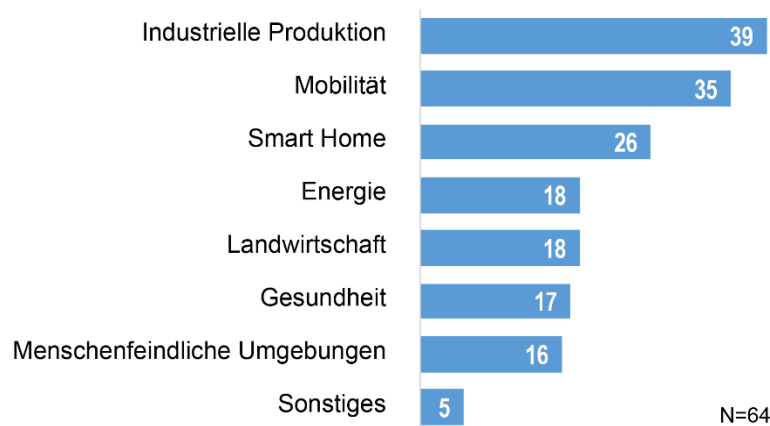
Abbildung 10 Organisationsart und Rolle der befragten Experten



(Freiwillige Angabe; Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 11 Anwendungsbereiche der befragten Organisationen

In welchen Anwendungsbereichen ist Ihre Organisation aktiv?

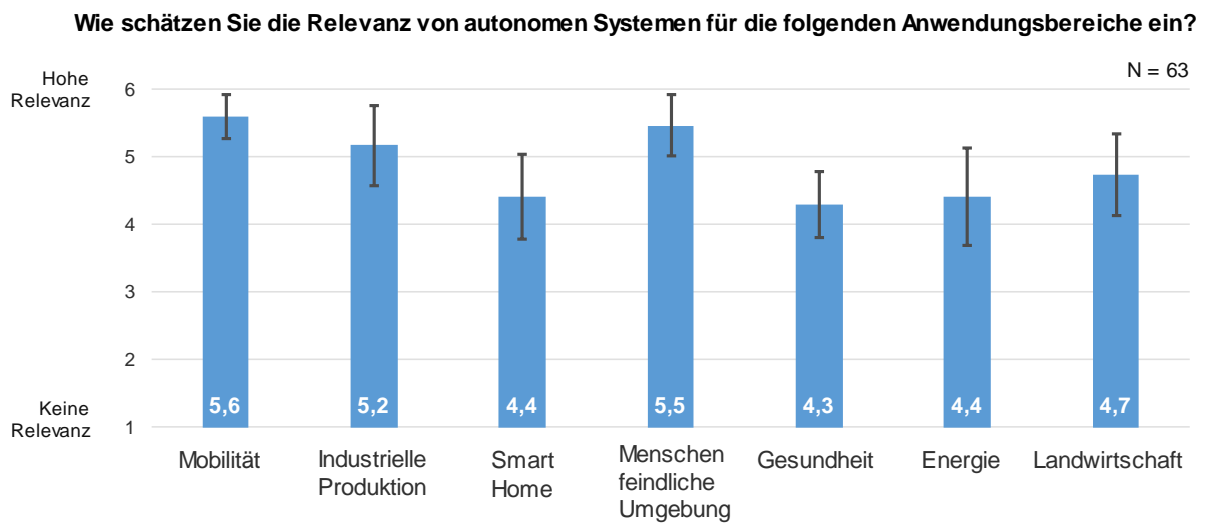


(Mehrfachauswahl zulässig; Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

3.1.1 Relevanz autonomer Systemen für die einzelnen Anwendungsbereiche

Zu Beginn des Fragebogens wurden den Experten die im Rahmen der Studie betrachteten Anwendungsbereiche vorgestellt. Um zu überprüfen, ob die Wahl der Anwendungsbereiche sinnvoll war, wurden die Experten gebeten, die Relevanz autonomer Systeme für die einzelnen Anwendungsbereiche auf einer Skala von 1 bis 6 zu bewerten (1 = Keine Relevanz, 6 = Sehr hohe Relevanz; Abbildung 12).

Abbildung 12 Relevanz autonomer Systeme für einzelne Anwendungsfelder



(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Insgesamt ergibt sich für alle Anwendungsbereiche eine mittlere bis sehr hohe Relevanz, wobei den Anwendungsbereichen Mobilität, menschenfeindliche Umgebungen und industrielle Produktion die höchste Relevanz attestiert wird. Aus Kommentaren sowie den Experteninterviews konnte entnommen werden, dass insbesondere im Bereich Gesundheit eher die Umsetzung von Assistenzfunktionen bzw. eine Teilautomatisierung angestrebt werden sollte als ein vollständig autonomer Betrieb.

Auch im Anwendungsbereich Smart Home sehen die Experten keine unmittelbare Notwendigkeit für den Einsatz vollständig autonomer Systeme. Obwohl nur ein kleiner Teil der befragten Experten selbst im Anwendungsbereich „Menschenfeindliche Umgebungen“ aktiv ist, wurde diesem Feld eine sehr hohe Relevanz zugewiesen. Die Experten sehen hier eine deutliche Notwendigkeit für den Einsatz autonomer Systeme.

„Landwirtschaft ist stark erfahrungsbasiert (wie Handwerk). Autonome Systeme haben auf absehbare Zeit in Teilbereichen unterstützenden Charakter“

Experte aus dem Bereich Landtechnik

„Im Gesundheitsbereich sehe ich mittelfristig eher ‚Unterstützungssysteme‘ als autonome Systeme“.

Experte aus der universitären Forschung

3.1.2 Entwicklungsstand autonomer Systeme

Autonome Systeme sind eine konsequente Weiterentwicklung von derzeit bestehenden teil- oder vollautomatisierten Systemen. Angelehnt an die in Kapitel 1 vorgestellten Entwicklungsstufen automatisierter Systeme wurden die Experten gebeten, den maximalen Entwicklungsstand technischer Systeme in den einzelnen Anwendungsbereichen einzuordnen (Abbildung 13).

Laut der befragten Experten weisen technische Systeme im Bereich der industriellen Produktion derzeit den höchsten Entwicklungsstand, bezogen auf die Entwicklungsstufen automatisierter Systeme, auf. Teil- bzw. hochautomatisierte Anlagen sind am Markt verfügbar und stellen das Fundament für Industrie 4.0 dar. Für Ansätze wie die vorausschauende Wartung, die aktuell von vielen Unternehmen als wichtiger Use Case für vernetzte und selbstlernende Anlagen propagiert wird, werden in Zukunft auch (teil-) autonome Systeme benötigt. Auch im Hinblick auf Mass Customization werden autonome Fertigungsanlagen laut Experten zunehmend an Bedeutung gewinnen.

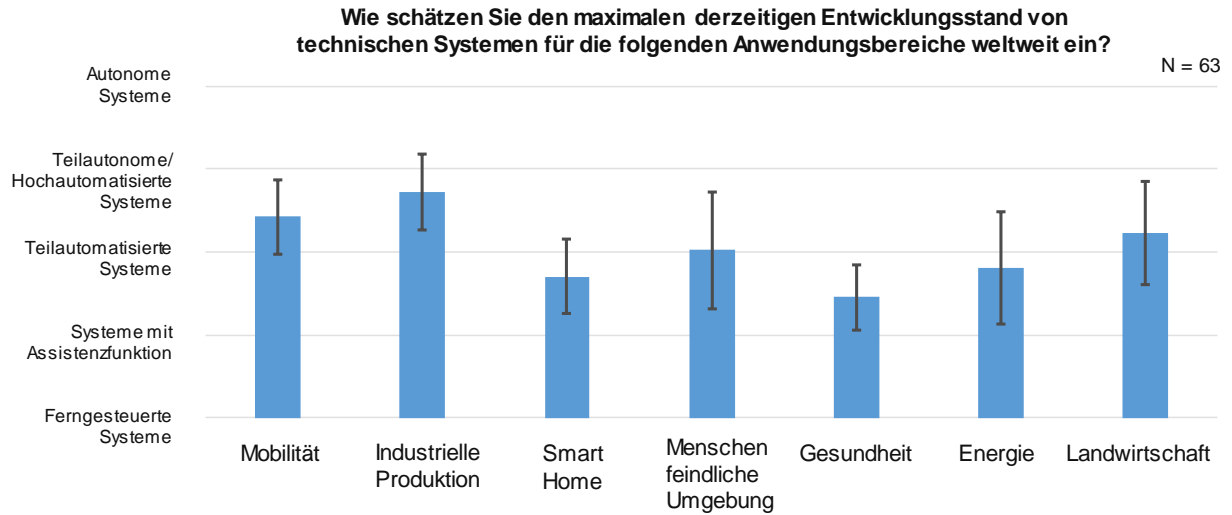
Der Entwicklungsstand im Bereich Mobilität erhält von den Experten die zweithöchste Bewertung. Der Anwendungsbereich erfährt derzeit die höchste gesellschaftliche Aufmerksamkeit, nicht zuletzt durch erste Produkte wie die Elektrofahrzeuge des Fahrzeugherstellers Tesla aus den USA, die mit teilautonomen Funktionen beworben werden¹⁰². Die befragten Experten weisen jedoch darauf hin, dass hierbei noch nicht von autonomen Fahrzeugen gesprochen werden kann, sondern lediglich eine Teilautonomie vorliegt, die sich auf sehr spezifische Situationen begrenzt. Dem Anwendungsbereich Landwirtschaft wird der dritthöchste Entwicklungsstand bzgl. autonomer Systeme zugesprochen. Obwohl autonomen Systeme im Bereich der Landwirtschaft weniger öffentliches Interesse zufällt, sind hier autonome Systeme bereits gut entwickelt und von hoher Relevanz (vgl. Abbildung 12).

Grundsätzlich sagt der aktuelle Entwicklungsstand nichts darüber aus, in welchem Zeitraum autonome Systeme für die einzelnen Anwendungsbereiche am Markt verfügbar sein werden. Um diese Frage zu beantworten, wurden die Experten gebeten, jedem Anwendungsbereich einen Zeithorizont zuzuordnen (Abbildung 14).

Für die Anwendungsbereiche „Industrielle Produktion“, „Mobilität“ und „Menschenfeindliche Umgebungen“ nennen die meisten Experten einen Zeitraum zwischen 5 und 20 Jahren, so dass sich im Mittel ein Zeithorizont von ca. 10 Jahren ergibt. Mit Blick auf die Bewertung des derzeitigen Entwicklungsstands und der Relevanz dieser Bereiche ergibt sich ein schlüssiges Bild. Interessant ist insbesondere die Einschätzung für den Zeithorizont im Bereich Smart Home. Trotz vergleichsweise geringem Entwicklungsstand und einer weniger hohen Relevanz, liegt der gemittelte Zeithorizont für die Verfügbarkeit vollständig autonomer Systeme unterhalb von 10 Jahren. Die Gründe könnten in einem aktuell sehr dynamischen Markt für Smart Home Systeme liegen, wobei insbesondere das Angebot an sprachgesteuerten Assistenzsysteme (z.B. Amazon Echo, Google Home, Apple HomePod) stark zunimmt. Diese Systeme suggerieren einen Einzug von künstlicher Intelligenz in Privathaushalte, woraus sich der Eindruck einer hohen Innovationsgeschwindigkeit aufdrängt.

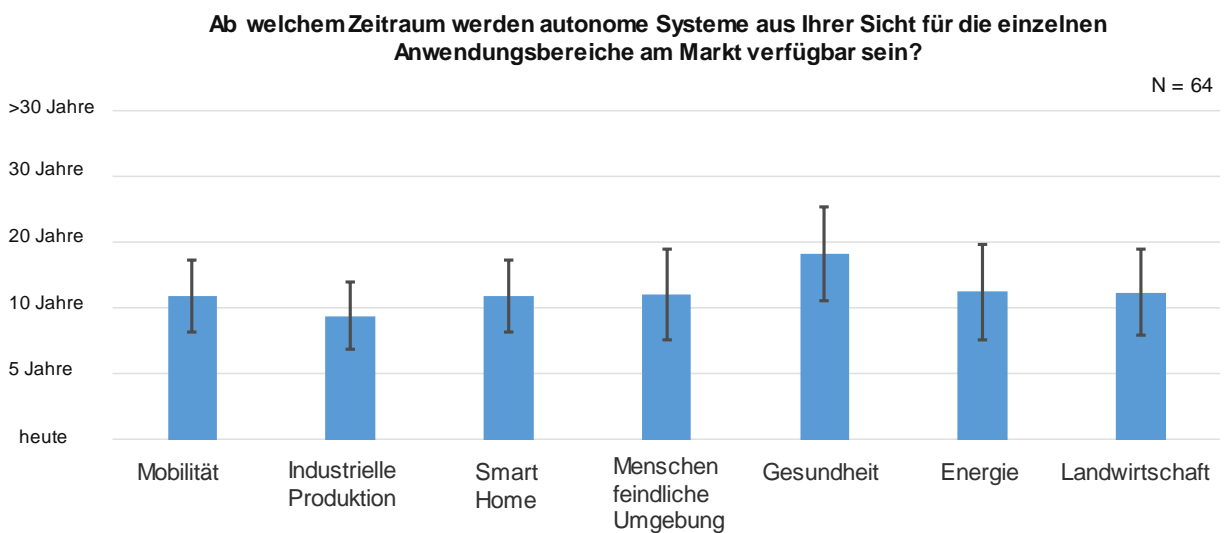
¹⁰² Vgl. Tesla 2017.

Abbildung 13 Aktueller maximaler Entwicklungsstand technischer Systeme in verschiedenen Anwendungsbereichen



(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 14 Einschätzung des Zeitraums bis zur Verfügbarkeit von autonomen Systemen in den einzelnen Anwendungsbereichen



(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

3.1.3 Nutzenpotenziale autonomer Systeme

Eine erfolgreiche Marktdurchdringung neuer Technologien ist maßgeblich davon abhängig, ob diese für den Anwender Nutzen stiften bzw. einen Mehrwert für die potenziellen Anwender darstellen. Im Fall von autonomen Systemen wurden verschiedene Nutzenpotenziale identifiziert, die von den Experten nach ihrer Wichtigkeit bewertet werden sollten (6=Höchste Bewertung, 1=Niedrigste Bewertung; Abbildung 15).

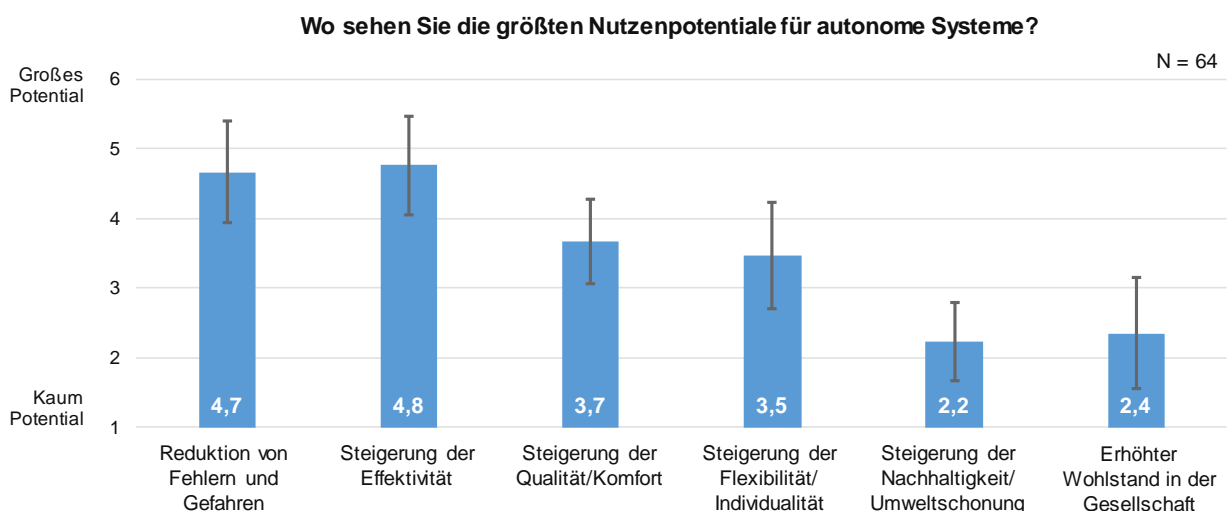
Die befragten Experten sehen die größten Nutzenpotenziale autonomer Systeme in:

Steigerung der Effizienz/Produktivität/Wirtschaftlichkeit: Autonome Systeme können zu jeder Zeit die optimale Lösung für eine Aufgabe finden und diese zur Umsetzung bringen. Für das Beispiel der industriellen Produktion bedeutet dies z.B. das Optimum aus der Zielstellung geringer Ressourcenverbrauch, hohem Durchsatz und hohe Liefertreue

Reduktion von Fehlern und Gefahren: Menschliches Versagen aber auch z.B. unvorhergesehene Ausfälle von Anlagen stellen eine hohe Fehler- und Gefahrenquelle für Personen und Sachgüter dar, die perspektivisch durch den Einsatz autonomer Systeme vermieden werden können.

Steigerung von Qualität bzw. Komfort: Die Lösung einer Aufgabe kann durch autonome Systeme reproduzierbar mit der bestmöglichen Qualität erfolgen, sofern dies gewünscht ist. Einschränkungen wie höhere Kosten oder höhere Zeiterfordernisse können dabei so gering wie möglich gehalten werden. Am Beispiel eines autonomen Fahrzeugs bedeutet dies konkret, dass nicht nur das Fahrwerk unabhängig von Geschwindigkeit und Fahrbahnbeschaffenheit immer den maximalen Komfort für die Insassen ermöglicht, sondern das Fahrzeug selbstständig den optimalen Fahrweg auf der Route wählt bzw. Anregungen durch Bodenwellen und weiterer Fahrbahnschäden weitestgehend kompensiert.

Abbildung 15 Rangfolge der Nutzenpotenziale autonomer Systeme



(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Weniger Potenzial sehen Experten in der Steigerung der Nachhaltigkeit und Umweltschonung sowie einem erhöhten Wohlstand der Gesellschaft. Aus Sicht der Experten können diese Ziele nicht rein technisch gelöst werden, sondern müssen gesamtgesellschaftlich adressiert werden. Autonome Systeme können hierbei lediglich eine unterstützende Rolle einnehmen.

3.1.4 Herausforderungen bei der Entwicklung autonomer Systeme

Es handelt sich bei autonomen Systemen um komplexe Systeme, deren Entwicklung Expertise aus vielen verschiedenen Fachbereichen benötigt (vgl. Die Experten wurden gebeten, die Ihrer Meinung nach größten Herausforderungen bei der Entwicklung autonomer Systeme auszuwählen). Es ergeben sich die folgenden Herausforderungen (vgl. Abbildung 16):

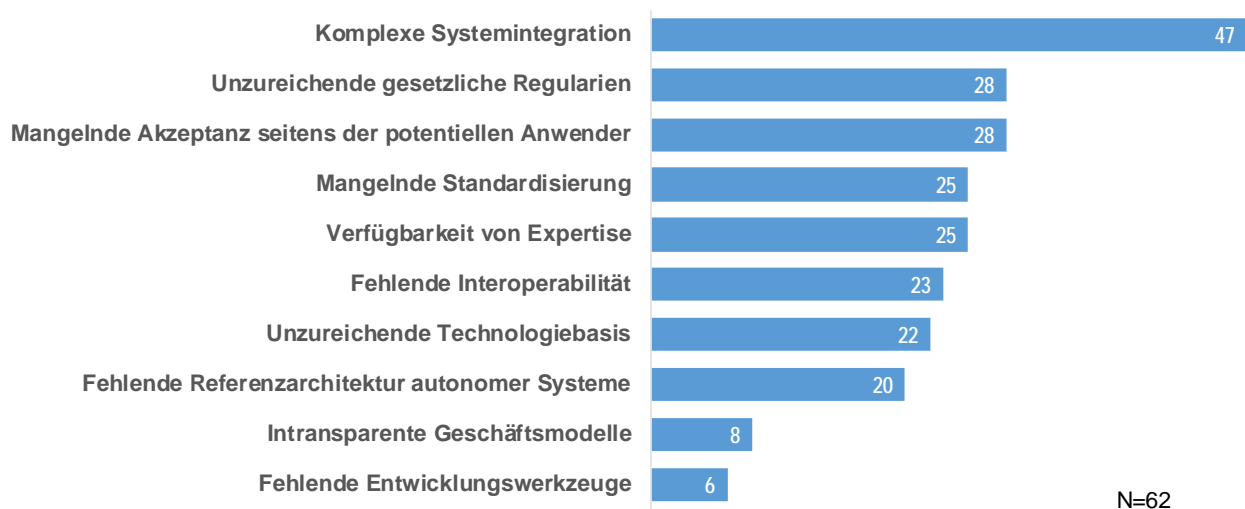
Komplexe Systemintegration: Autonome Systeme basieren auf der Verzahnung vieler Fachdisziplinen und Einzeltechnologien. Die Orchestrierung der involvierten Teildisziplinen erfordert eine enge Kommunikation und Kooperation. Alle an der Entwicklung beteiligten Stakeholder müssen von Beginn an zusammenwirken, um eine vollständige Systemspezifikation zu erarbeiten und die Abhängigkeiten der einzelnen Teilsysteme untereinander während der gesamten Entwicklung berücksichtigen. Die komplexe Systemintegration wurde mit Abstand von den meisten Experten als Herausforderung bei der Entwicklung autonomer Systeme genannt.

Gesetzliche Regularien: Regularien spielen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von technischen Systemen und sind insbesondere für autonome Systeme von hoher Relevanz. Schon zu Beginn eines Entwicklungsprozesses müssen gesetzliche Vorschriften und weitere Regularien im Anforderungskatalog berücksichtigt werden. Autonome Systeme müssen in der Lage sein, selbstständig Entscheidungen auch in ungeplanten Situationen zu treffen. Ohne einen gesetzlich vorgegebenen Handlungsrahmen für solche Systeme gehen Hersteller ein großes Risiko z.B. im Hinblick auf Haftungsfragen ein. Umstritten ist jedoch, in welchem Maße gesetzliche Regularien benötigt werden. Einige Experten sind der Meinung, dass eine zu starke Regulierung die Innovation im Bereich der autonomen Systeme bremsen könnte.

Mangelnde Akzeptanz seitens der potenziellen Anwender: Die Fähigkeit autonomer Systeme, die Selbstregulierung auch in komplexeren Situationen aufrecht zu erhalten, kann unter Umständen dazu führen, dass Anwender einen Kontrollverlust empfinden. Hersteller sehen sich auch deshalb mit Vorbehalten gegenüber Produkten mit entsprechenden Fähigkeiten konfrontiert. Hinzu kommt die begründete Angst, dass durch den Einsatz autonomer System Arbeitsplätze wegfallen können. Dies unterstreicht, dass es sich bei autonomen Systemen über weite Bereiche um sozio-technische Systeme handelt, deren Entwicklung neue Wege erfordert.

Mangelnde Standardisierung: Einheitliche Schnittstellen, Protokolle u.ä. erleichtern die Entwicklung und den Betrieb von komplexen technischen Systemen. Für das relativ junge Forschungsfeld der autonomen Systeme fehlt es derzeit jedoch weitgehend an anwendbaren Standards. Übergreifende Standards sind insbesondere aufgrund der heterogenen Anwendungsbereiche für autonome Systeme schwierig zu erreichen. Aber auch in den einzelnen Anwendungsbereichen werden fehlende Standards als Hindernis gesehen.

Abbildung 16 Herausforderungen bei der Entwicklung von autonomen Systemen



(Anzahl der Nennungen; Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Bestehende Standards der jeweiligen Anwendungsbereiche berücksichtigen die spezifischen Charakteristika autonomer Systeme nur unzureichend.

Verfügbarkeit von Expertise: Die Entwicklung autonomer Systeme erfordert Experten aus den aufgezeigten Technologiebereichen, die für sich genommen bereits breite Forschungsfelder sind. Aus Sicht der Experten mangelt es in vielen dieser Bereiche an Spezialisten, die für die komplexe Systementwicklung benötigt werden. Dies wird unter anderem dadurch begründet, dass es nur wenige Hochschulen gibt, die entsprechende Fachrichtungen anbieten. Weitere gravierende Kompetenzdefizite bestehen auf den Gebieten der Systemarchitektur und Systemintegration.

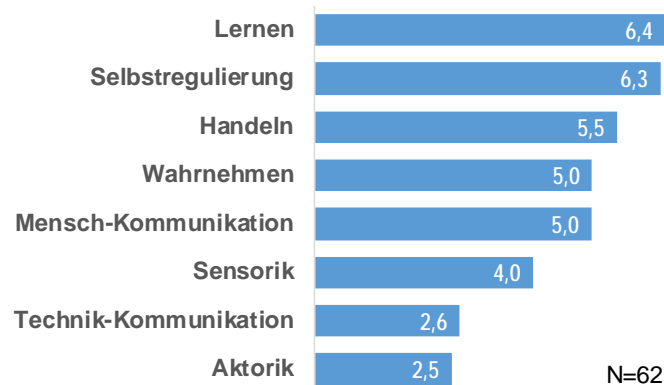
Nur wenige Experten sehen intransparente Geschäftsmodelle oder fehlende Entwicklungswerkzeuge als Hindernis bei der Entwicklung autonomer Systeme. Ob für autonome Systeme bereits attraktive Geschäftsmodelle bestehen ist dennoch fraglich. Vielmehr drängt sich die Vermutung auf, dass sich die Frage nach dem passenden Geschäftsmodells noch nicht gestellt wird und zunächst technische Herausforderungen adressiert werden.

3.1.5 Entwicklungsbedarf in Technologiebereichen

Autonome Systeme können in einzelne Technologiebereiche aufgeteilt werden, deren Zusammenspiel in einem Gesamtsystem für einen autonomen Betrieb notwendig ist. Für einige Technologiebereiche ergibt sich ein erhöhter Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Abbildung 17 stellt die Rangfolge des Entwicklungsbedarfs dar, die sich aus der Einschätzung der Experten ergibt.

Der größte Entwicklungsbedarf besteht nach Meinung der Experten in den Technologiebereichen „Lernen“ und „Selbstregulierung“. Diesen Aspekten wird insgesamt eine hohe Bedeutung für den Fortschritt im Bereich autonome Systeme zugeschrieben.

Abbildung 17 Rangfolge des Entwicklungsbedarfs in den Technologiebereichen autonomer Systeme



(8 = höchster Entwicklungsbedarf, 1 = Niedrigster Entwicklungsbedarf; Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Wenig Entwicklungsbedarf sehen die Experten hingegen in den Bereichen „Technik-Kommunikation“ und „Aktorik“. Die vorhandenen Technologien in diesen Bereichen werden insgesamt als ausgereift mit nur geringem Verbesserungspotenzial bewertet. Insgesamt ist festzustellen, dass insbesondere bei den Kerntechnologien autonomer Systeme (vgl. Abschnitt 1.2) noch Entwicklungsbedarf besteht, für die Umgebungstechnologien jedoch weniger.

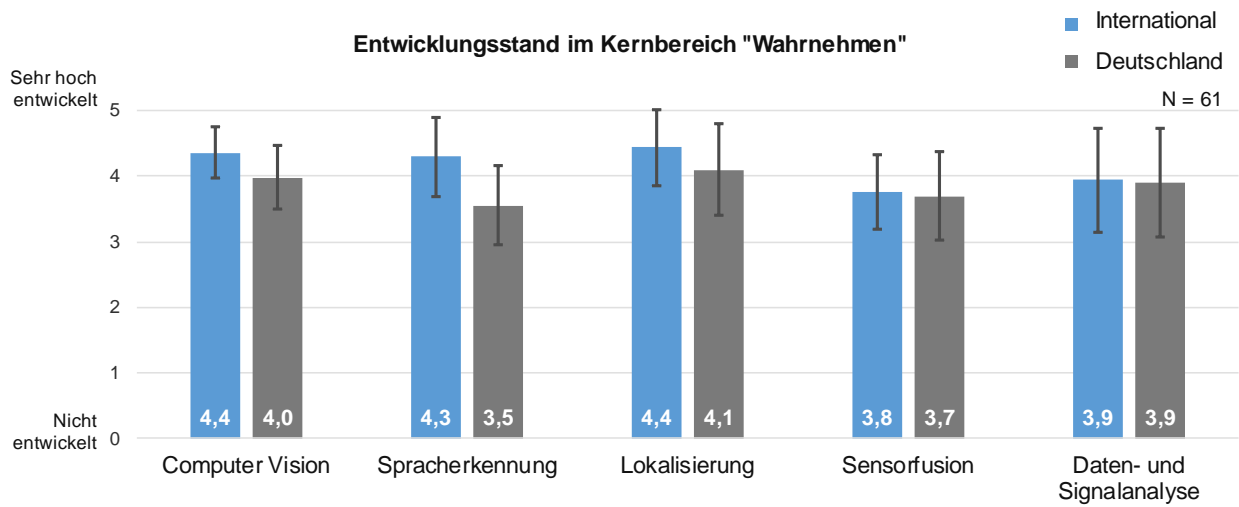
3.1.6 Entwicklungsstand der Technologiebereiche in Deutschland im internationalen Vergleich

Um die einzelnen Technologiebereiche wie Wahrnehmen und Lernen zu differenziert bewerten zu können, werden sie weiter unterteilt (vgl. Abbildung 18 bis 21). Zur Einschätzung des Standorts Deutschland für die Entwicklung autonomer Systeme bewerteten die Experten den deutschen und den internationalen Entwicklungsstand in den einzelnen Technologien.

Insgesamt werden die verfügbaren Technologien und Lösungen aus dem Kernbereich „Wahrnehmen“ als gut entwickelt bewertet (Abbildung 18). Die einzelnen Technologiebereiche schneiden bei der Bewertung des internationalen Entwicklungsstands sehr ähnlich ab, wobei die Bereiche „Sensorfusion“ und „Daten- und Signalanalyse“ einen etwas geringeren Entwicklungsstand aufweisen. In diesen Bereichen ergibt sich kein signifikanter Unterschied zum Entwicklungsstand in Deutschland. Für die Bereiche „Computer Vision“, „Spracherkennung“ sowie „Lokalisierung“ sehen die Experten jedoch einen geringfügig niedrigeren Entwicklungsstand in Deutschland im Vergleich zum Rest der Welt.

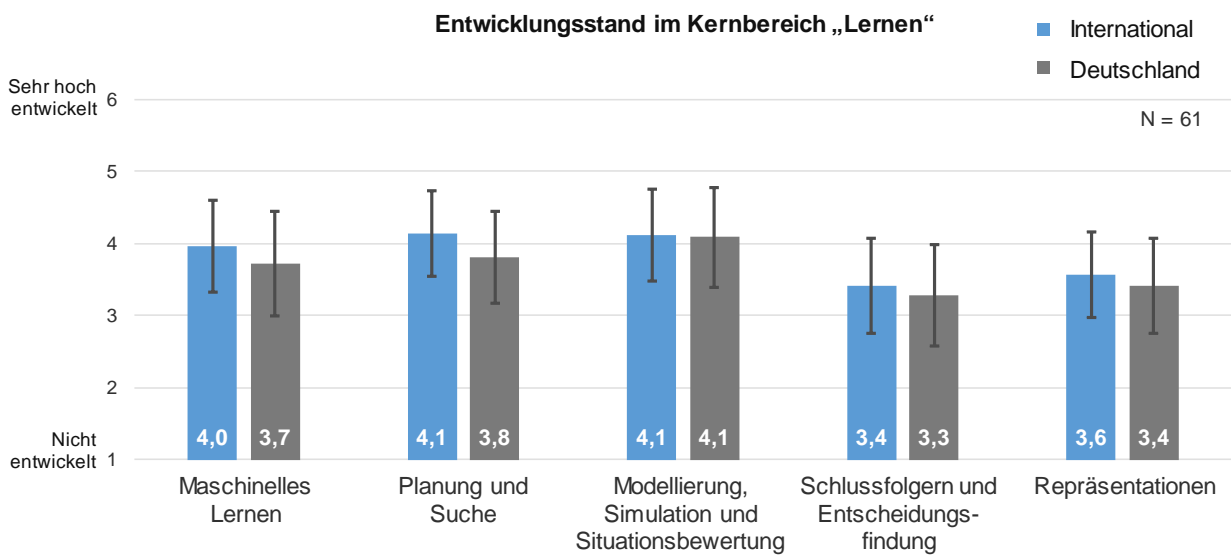
Im Bereich „Lernen“ (Abbildung 19) wird „Schlussfolgern und Entscheidungsfindung“ der geringste Entwicklungsstand bescheinigt. Der Bereich Modellierung und Simulation hat laut Experten den höchsten Entwicklungsstand, wobei hier auch kein Unterschied zwischen Deutschland und dem Rest der Welt gesehen wird. In allen anderen Bereichen liegt der Entwicklungsstand in Deutschland nur geringfügig hinter dem internationalen Entwicklungsstand.

Abbildung 18 Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Wahrnehmen“



(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 19 Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Lernen“



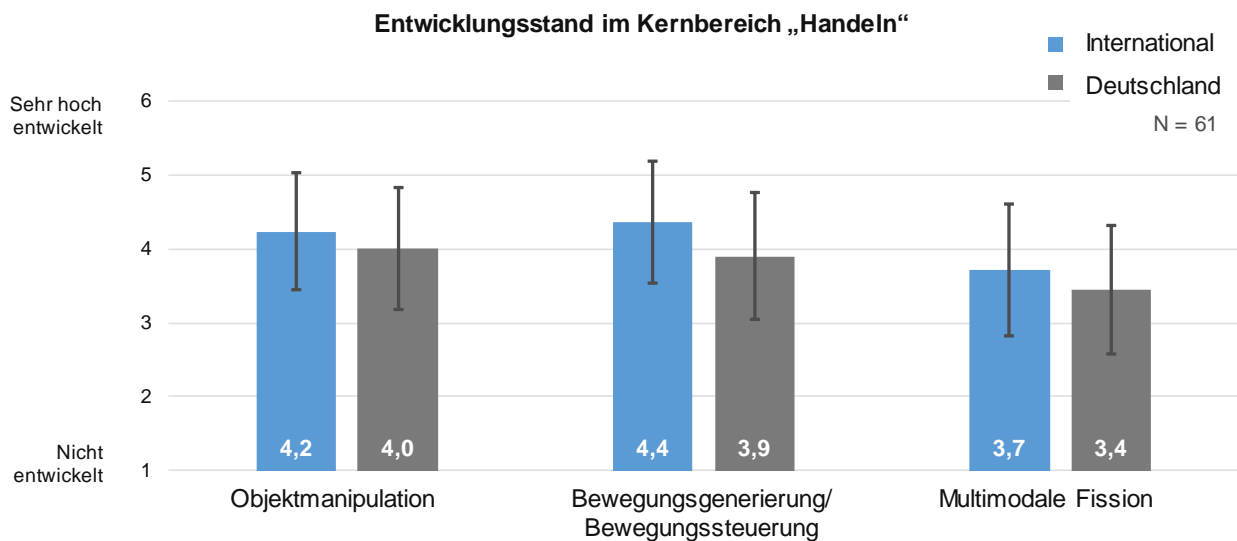
(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Die einzelnen Technologiebereiche für den Kernbereich „Handeln“ (Abbildung 20) haben laut Einschätzung der Experten einen mittleren bis hohen Entwicklungsstand, wobei der Bereich der Bewegungsgenerierung und Bewegungssteuerung international in der Kategorie den höchsten Entwicklungsstand aufweist. Der Unterschied zu Deutschland ist hier auch etwas deutlicher als bei den anderen Bereichen. Insgesamt liegt die Bewertung der Technologiebereiche für Deutschland aber nicht weit hinter der internationalen Bewertung.

Der Entwicklungsstand im Kernbereich „Selbstregulierung“ (Abbildung 21) ist insgesamt im Vergleich zu den anderen Technologiebereichen nach Einschätzung der Experten am geringsten entwickelt. Der Bereich Selbstschutz, Selbsterhaltung und Selbstheilung schneidet dabei am schlechtesten ab. Es besteht kein nennenswerter Unterschied zwischen Deutschland und dem Rest der Welt.

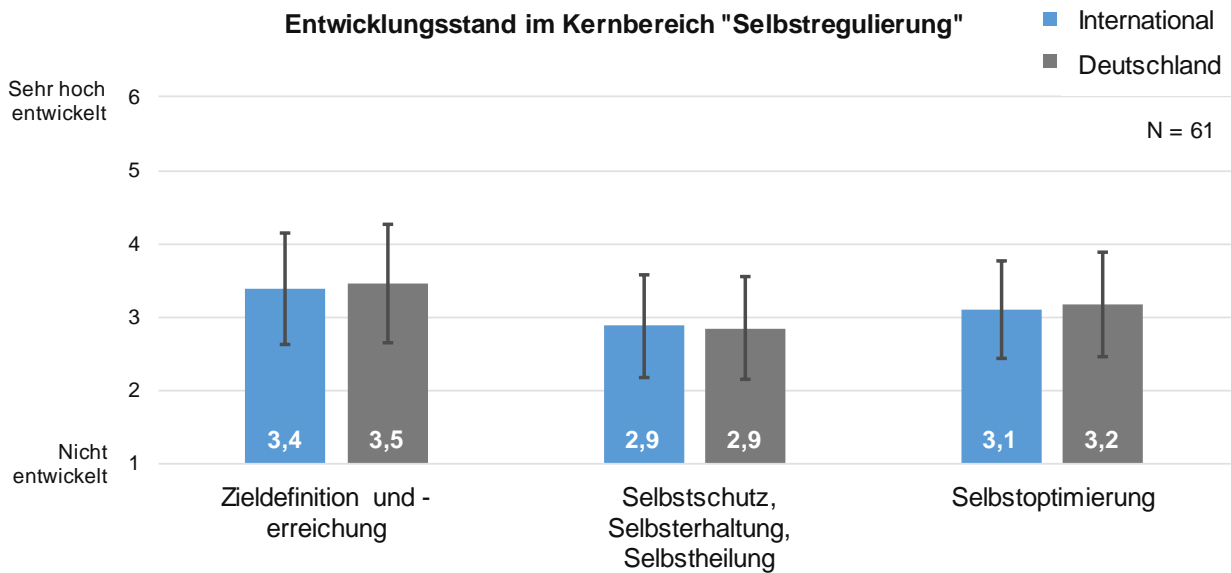
Der Entwicklungsstand der Umgebungstechnologien in den Bereichen „Sensorik“ und „Aktorik“ wird insgesamt am höchsten bewertet (Abbildung 22). Für Deutschland ergibt sich im internationalen Vergleich im Bereich „Aktorik“ sogar ein leicht besserer Entwicklungsstand.

Abbildung 20 Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Handeln“



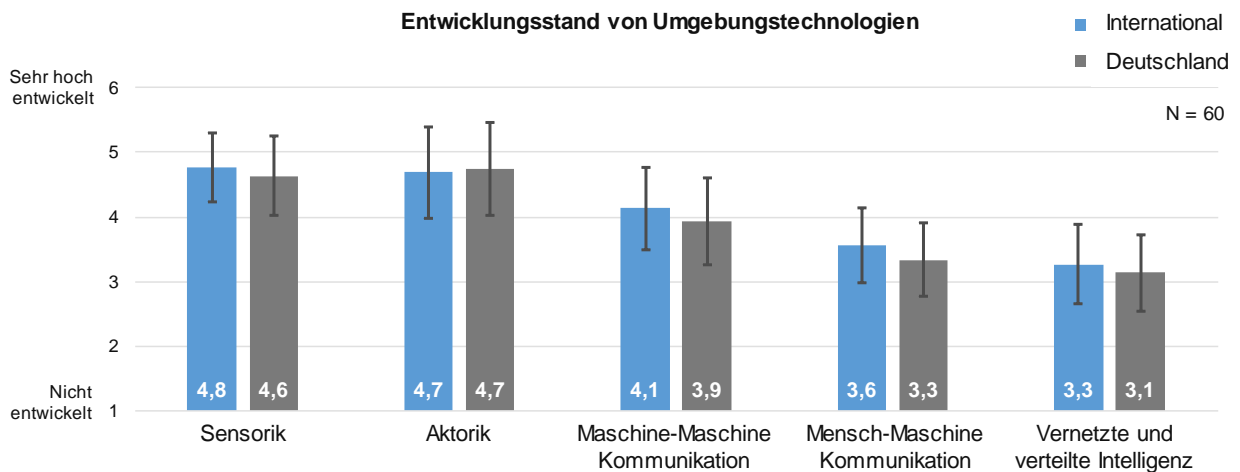
(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 21 Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Selbstregulierung“



(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Abbildung 22 Internationaler und nationaler Entwicklungsstand im Kernbereich „Umgebungstechnologien“

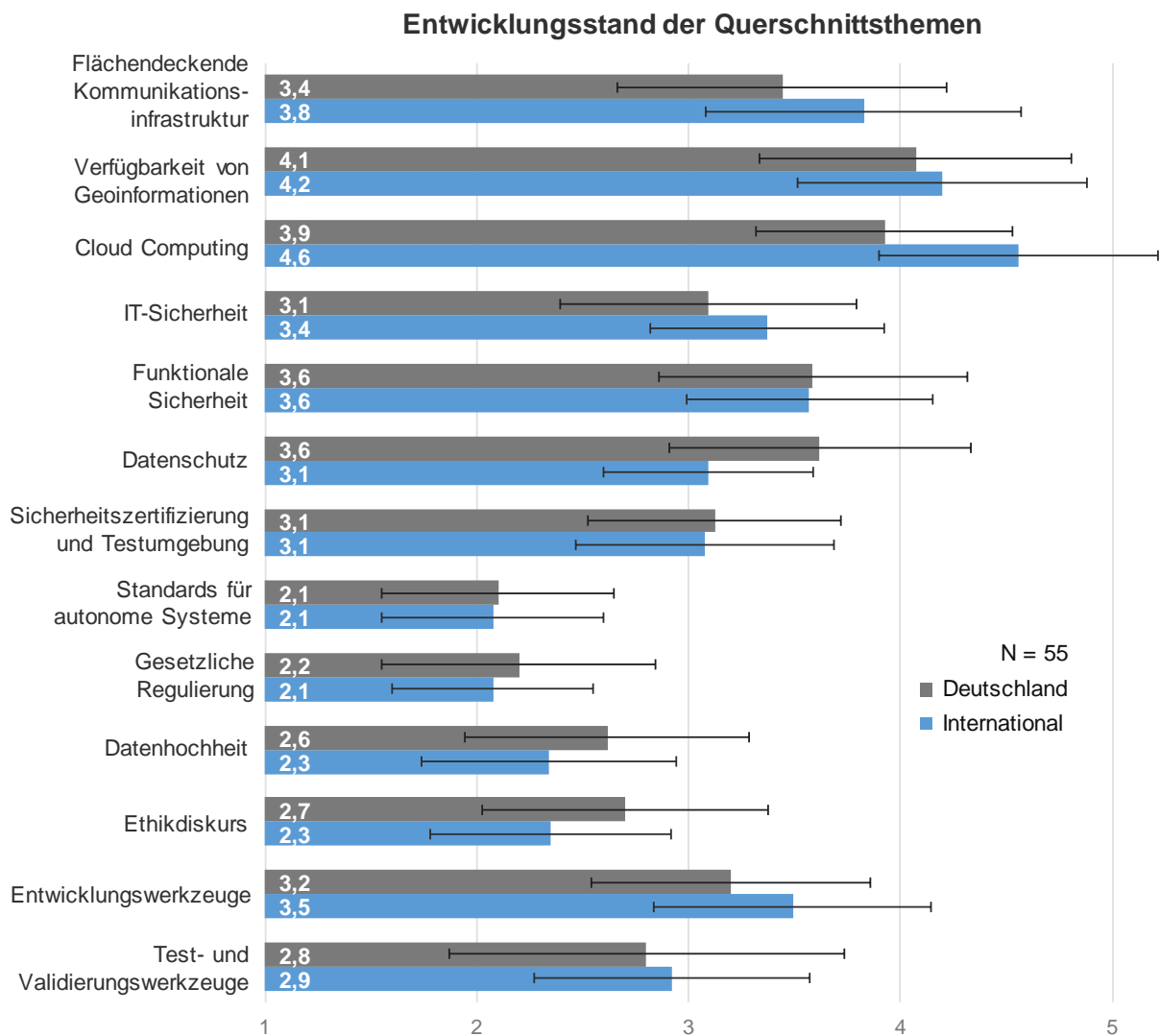


(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

3.1.7 Entwicklungsstand von Querschnittsthemen

Neben den technischen Bereichen autonomer Systeme wurden vier Querschnittsthemen identifiziert (siehe Abbildung 2), die wiederum in weitere Themen untergliedert wurden. Im Rahmen der Online-Befragung wurden die Experten gebeten, Ihre Einschätzung zu dem Entwicklungsstand des jeweiligen Querschnittsthemas für Deutschland und für den Rest der Welt anzugeben (Abbildung 23).

Abbildung 23 Internationaler und nationaler Entwicklungsstand in Querschnittsthemen



(Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

Den höchsten Entwicklungsstand erreichen die Themen „Cloud-Computing“, „Verfügbarkeit von Geo-Informationen“ sowie „Flächendeckende Kommunikationsinfrastruktur“. Die Experten sehen in den Querschnittsthemen „Datenschutz“, „Datenhoheit“ sowie „Ethikdiskurs“ im internationalen Vergleich einen höheren Entwicklungsstand in Deutschland, wobei die letzteren beiden Themen insgesamt mit einem eher niedrigen Entwicklungsstand bewertet werden. In den Bereichen „Flächendeckende Kommunikationsinfrastruktur“ „Cloud-Computing“ sowie „IT-Sicherheit“ schneidet Deutschland im Vergleich etwas schlechter ab. In den restlichen Themen kann kein Unterschied zwischen Deutschland und dem Rest der Welt gesehen werden.

3.1.8 Entwicklungsstand in Deutschland im Vergleich zu ausgewählten Nationen

Neben der Bewertung des nationalen und internationalen Entwicklungsstands einzelner Technologiebereiche wurden die Experten ebenfalls um eine allgemeine Einschätzung des Entwicklungsstandes ausgewählter Länder im Vergleich zu Deutschland gebeten (Abbildung 24).

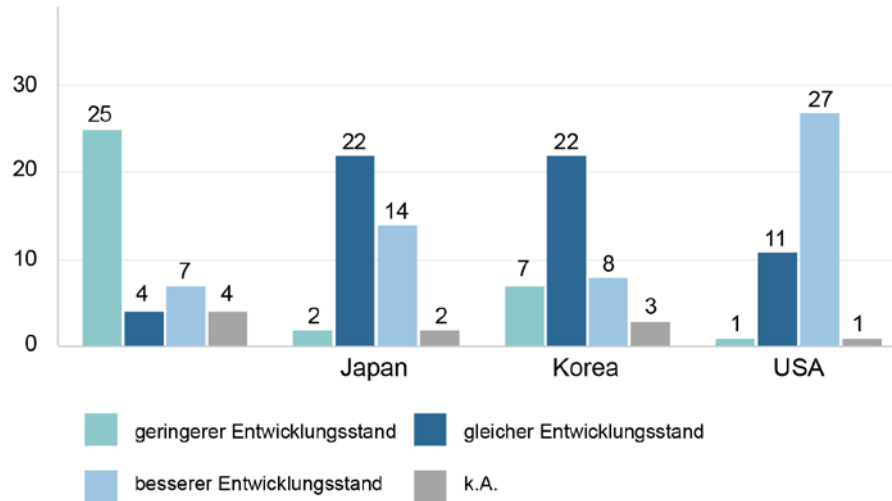
Die meisten Experten sind sich einig, dass China im Vergleich zu Deutschland einen deutlich geringeren Entwicklungsstand im Bereich der autonomen Systeme vorweisen kann. Des Weiteren ist ein Großteil der Experten überzeugt, dass die USA besser positioniert sind als Deutschland, während in Japan ähnliche Ausgangsbedingungen wie in Deutschland herrschen würden. Israel wurde von mehreren Experten als ein weiteres Land mit einem hohen Entwicklungsstand auf dem Gebiet der autonomen Systeme eingestuft.

„China hat einen geringeren Entwicklungsstand [als Deutschland] aber bessere Datenverfügbarkeit und Umsetzungsmöglichkeiten.“

Experte aus der universitären Forschung

Als Grund für ein besseres Abschneiden der USA nannten einige Experten u.a. die weniger risikoscheue Herangehensweise bei der Entwicklung autonomer Systeme. Im Vergleich zu Deutschland bestehe in den USA nicht von Anfang an der Anspruch, alle Aspekte zu berücksichtigen und in der Planung umzusetzen, d.h. Risiken, z.B. im Hinblick auf Markterfolg, würden in Kauf genommen. In Deutschland bremse zudem eine ausladende Diskussion über Regularien und Standards die Umsetzung. Trotz des geringeren Entwicklungsstandes von China wird die höhere gesellschaftliche Akzeptanz für autonome Systeme von den Experten als großes Potenzial angesehen.

Abbildung 24 Entwicklungsstand von ausgewählten Ländern im Bereich autonome Systeme im Vergleich zu Deutschland



(Anzahl der Nennungen; Quelle: eigene Daten; acatech, DFKI, IEM)

3.1.9 Forschungsförderung und Regulierung

Viele der befragten Experten beteiligen sich bereits in laufenden Förderprogrammen im Kontext autonomer Systeme oder angrenzender Bereiche. Hierzu zählen sowohl nationale Förderprogramme des BMBF und des BMWi als auch EU-Förderprogramme im Rahmen des Horizon 2020-Programms. Auf die Frage nach Lücken in den bekannten Forschungsprogrammen wurden insbesondere die Themen Kognition bzw. maschinelles Lernen, funktionale und IT-Sicherheit sowie Systemintegration als nicht ausreichend adressiert genannt.

Die Experten wurden ebenso zu dem Themenfeld der (gesetzlichen) Regulierung für autonome Systeme befragt. Am häufigsten nannten die Experten ungeklärte Haftungsfragen als Problem, welches nur durch entsprechende Regularien gelöst werden könne und momentan ein großes Hindernis für Unternehmen darstelle. Ebenfalls häufig wurden unzureichend geklärte datenschutzrechtliche Aspekte als Beispiel für fehlende Regulierung genannt. Einige Experten vertreten die Meinung, dass nur durch eine wenig restriktive Regulierung eine verbreitete Nutzung und ein entsprechender Markterfolg für autonome Systeme sichergestellt werden könne. Als positives Beispiel für eine sinnvolle Regulierung werden u.a. die in im US-Bundestaat Kalifornien vorgestellten Regularien zum Testen autonomer Fahrzeuge genannt¹⁰³.

¹⁰³ Vgl. DMV Kalifornien 2017b.

Wo sehen Sie aktuell noch Lücken bei der Forschungsförderung im Hinblick auf autonome Systeme?

„Es ist ein "Einfangen" und sinnvolles Begrenzen des Datenschutzes, sowie der Ethik- und Sicherheitsdiskussion nötig. Jene Themen stehen einer Entwicklung autonomer Systeme in Deutschland und in der EU sehr stark im Weg und führen zu einer weiteren Abwanderung der entsprechenden Spitzenforschung in die USA.“

Experte aus der universitären Forschung

„In den Bereichen Smart Home und Gebäude im Allgemeinen, da diese die Schnittstelle für Menschen darstellen und u.a. im Kontext mit Mobilität und Energie stehen.“

Experte aus dem Bereich der Gebäudeautomation

„Deutschland benötigt ein anwendungsbezogenes Förderprogramm im Bereich Autonomer Transport.“

Experte aus dem Bereich Automatisierung

3.2 SWOT Analyse

Aus den Ergebnissen der Online-Befragung wurden Beobachtungen über den technischen Entwicklungsstand sowie die Rahmenbedingungen für autonome Systeme in Deutschland abgeleitet, die im Rahmen der Experteninterviews intensiv diskutiert wurden. Die Experten wurden darüber hinaus gebeten, ihre Eindrücke zu den Entwicklungen in unterschiedlichen Ländern zu schildern und die Gründe für die teilweise vorhandenen Unterschiede zu identifizieren. Hieraus wurden im Sinne einer SWOT-Analyse Stärken und Schwächen des Standorts Deutschland sowie die Chancen und Risiken abgeleitet und konsolidiert, die im Folgenden vorgestellt werden (Tabelle 3).

Stärken: Aus technologischer Sicht ist Deutschland auf dem Gebiet der autonomen Systeme im internationalen Vergleich gut aufgestellt. Defizite ergeben sich nur in den Technologiebereichen Spracherkennung, Computer Vision, Lokalisierung und Bewegungsgenerierung. Im Bereich „Aktorik“ wird Deutschland sogar ein höherer Entwicklungsstand als im Rest der Welt bescheinigt. Vor diesem Hintergrund kann eine ausgereifte Technologiebasis als Stärke von Deutschland gezählt werden. Zu den weiteren Stärken Deutschlands zählt der etablierte Wissens- und Technologietransfer zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen, der insbesondere für den Kooperationserfolg von großer Bedeutung ist. Die ausgeprägte Investitionsbereitschaft seitens der öffentlichen Fördergeber ist für einzelne Anwendungsbereiche, wie z.B. Mobilität gegeben und kann als Stärke gewertet werden. Ebenfalls als Stärke zählt das hohe Bewusstsein für die Relevanz autonomer Systeme in unterschiedlichen Anwendungsbereichen, welches in Fachkreisen vorhanden ist. Zudem existiert ein offener gesellschaftlicher Diskurs auch zu dem Thema autonome Systeme, der Impulse für zukünftige Umsetzungen liefert und insbesondere im Hinblick auf die Nutzerakzeptanz zu berücksichtigen ist.

Tabelle 3 SWOT Analyse des Forschungs- und Innovationsstandorts Deutschland im Kontext autonome Systeme

Stärken/Strengths	Schwächen/Weaknesses
<p>S1. Ausgereifte Technologiebasis in vielen Bereichen</p> <p>S2. Wissens- und Technologietransfer zwischen Forschung und Industrie</p> <p>S3. Investitionsbereitschaft seitens öffentlicher Fördergeber für ausgewählte Anwendungsbereiche (z.B. Mobilität)</p> <p>S4. Hohes Bewusstsein für die Relevanz autonomer Systeme in Fachkreisen</p> <p>S5. Offener gesellschaftlicher Diskurs vorhanden</p>	<p>W1. Unzureichende/fehlende Fokussierung auf Systementwurf und -integration</p> <p>W2. Geringerer Entwicklungsstand in einzelnen Technologiebereichen (z.B. Spracherkennung, IT-Systeme) im internationalen Vergleich</p> <p>W3. Ungewisse Regulierung und Haftungsfragen in bestimmten Anwendungsbereichen</p> <p>W4. Investitionen seitens öffentlicher Fördergeber zu stark auf ausgewählte Anwendungsbereiche fokussiert (vgl. S3)</p> <p>W5. Förderaktivitäten beschränken sich vorwiegend auf Technologieentwicklung und weniger auf die Anwendungsgestaltung</p>
Chancen/Opportunities	Risiken/Threats
<p>O1. Technologieführerschaft in ausgewählten Anwendungsbereichen (Mobilität, industrielle Produktion) wird ausgebaut. Deutsche Unternehmen werden zu führenden Systemanbietern</p> <p>O2. Deutschland wartet nicht auf andere, sondern nimmt selbst die Vorreiterrolle für Regulierung ein (Vorbildfunktion für EU und den Rest der Welt)</p> <p>O3. Stark wachsender Markt für autonome Systeme in Deutschland aufgrund erkannter Nutzenpotenziale (z.B. Effizienzsteigerung) wächst rapide</p>	<p>T1. Deutschland wird international abgehängt durch mangelhafte Marktreife der Systeme</p> <p>T2. Unternehmen begeben sich in Abhängigkeit externer Akteure und werden zu austauschbaren Zulieferern</p> <p>T3. Defizite bei zentralen Kompetenzen für autonome Systeme in Deutschland</p> <p>T4. Uninformierter Diskurs beeinflusst öffentliches Meinungsbild negativ und senkt Nutzerakzeptanz für autonome Systeme</p> <p>T5. Mangelnder Konsens hinsichtlich notwendiger Regulierung</p>

Schwächen: In der Forschung und Entwicklung im Bereich der autonomen Systeme liegt der Fokus meist auf einzelnen Technologieschwerpunkten. Der kritische Aspekt fachdisziplinübergreifender Systementwurf und -integration wird nur unzureichend adressiert und von den meisten Experten sogar als größte Herausforderung bei der Realisierung autonomer Systeme gesehen. Zu den Schwächen zählen außerdem ein geringerer Entwicklungsstand in einigen wenigen Technologiebereichen sowie ungewisse Regulierungen und Haftungsfragen in bestimmten Anwendungsbereichen. Bei der öffentlichen Förderung besteht zurzeit eine Fokussierung auf wenige Anwendungsbereiche, so dass andere spezifische Bereiche (wie z.B. Medizintechnik) im Kontext autonomer Systeme noch nicht berücksichtigt werden. Insgesamt beschränken sich Förderaktivitäten überwiegend auf Technologieentwicklung und nicht auf Anwendungsgestaltung und Markterfolg.

Chancen: Die vorhandene Technologiebasis bietet ein enormes Geschäftspotenzial für deutsche Unternehmen. Dies auszuschöpfen erfordert ausgeprägte Kompetenzen in den Bereichen Systementwurf und -integration und Geschäftsmodelle sowie unternehmensübergreifende Kooperationen. Die deutsche Technologieführerschaft in ausgewählten Gebieten kann so zu einer Führerschaft im Bereich autonomer Systeme ausgebaut werden. Allerdings dürfen deutsche Unternehmen nicht darauf warten, dass Standards und Regulierungen geschaffen werden, sondern erwirken diese auf nationaler Ebene durch schnelle Umsetzungen mit Referenzcharakter. Hieraus entstehende Standards und Regularien können dann eine EU-weite Anwendung finden. Der Erfolg autonomer Systeme hängt auch maßgeblich von der Nutzerakzeptanz und einer entsprechenden Verbreitung ab. Durch den Abbau von Vorbehalten der potenziellen Anwenderinnen und Anwender und einer schnellen Umsetzung von Referenzanwendungen, kann der Markt für autonome Systeme zunehmend erschlossen werden.

Risiken: Mangelnde Marktreife sowie ein zu zögerlicher Markteintritt könnte dazu führen, dass deutsche Unternehmen durch internationale Wettbewerber abgehängt werden, wenn diese mit ihren Produkten früher in den Markt gehen. Deutsche Unternehmen könnten so in die Rolle von austauschbaren Ausführeern gedrängt werden. Sollten deutsche Unternehmen generell zunehmend auf die Kompetenz ausländischer Unternehmen setzen (z.B. im Bereich der Künstlichen Intelligenz), besteht ebenfalls die Gefahr einer Abhängigkeit. Dies hätte ebenfalls zur Folge, dass sich in Schlüsseltechnologien erhebliche Kompetenzdefizite bilden. Bei der Entwicklung autonomer Systeme sind Unternehmen unter anderem auch auf geschäftsförderliche Rahmenbedingungen angewiesen. So würde ein mangelnder Konsens über notwendige und hinreichende Regulierungen die Gefahr in sich bergen, Entwicklungen zu bremsen. Eine Gefahr ergibt sich zudem aus einem uninformatierten Diskurs, der zu einer sinkenden Nutzerakzeptanz hinsichtlich des Einsatzes autonomer Systeme führen, hätte dies negative Auswirkungen auf das Marktpotenzial entsprechender Systeme.

4 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Die nachfolgenden Handlungsempfehlungen basieren auf den in Kapitel 2 und 3 vorgestellten Recherchen, der Online-Umfrage sowie den Ergebnissen der im Rahmen der Studie durchgeführten Expertenworkshops. Eine wesentliche Schwierigkeit ist die trennscharfe Unterscheidung von autonomen Systemen und hochautomatisierten Systemen. Die Fähigkeiten und Grenzen der jeweiligen Systeme sind fließend und ein Indiz dafür, dass es voraussichtlich in vielen Anwendungsgebieten einen langsamen Übergang geben wird, in dem Systeme mit unterschiedlichsten Automatisierungsgraden neben- und miteinander funktionieren müssen. Die jeweiligen Entwicklungsgeschwindigkeiten hin zu autonomen Systemen hängen dabei sehr stark von den jeweiligen Anwendungsgebieten ab. Die Aufgabe der Studie ist, einen ersten Überblick über den aktuellen Stand autonomer Systeme in den relevanten, aktuellen bzw. absehbaren Anwendungsfeldern zu geben. Die Studienergebnisse und Handlungsempfehlungen sind deshalb als Diskussionsgrundlage zu verstehen, die Impulse für weitere, vertiefende Untersuchungen zum Entwicklungsstand von und potenziellen Anwendungsfeldern für autonome Systeme geben sollen.

Wesentliche Weiterentwicklungen von Komponenten und autonomen Gesamtsystemen finden derzeit im industriellen Umfeld statt, weshalb es im Kontext dieser Studie nur sehr begrenzt möglich war, tiefere Informationen zum aktuellen Forschungsstand der Industrie zu erhalten. Auch die Informationsbeschaffung zur Forschung in anderen Weltregionen, gerade im asiatischen Raum, gestaltete sich als Herausforderung. Um die von den Studienautoren initial formulierten Thesen zu validieren, wurden sie auf den Expertenworkshops mit Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft umfassend diskutiert und in die nachfolgenden Handlungsempfehlungen überführt.

4.1 Weitere relevante Anwendungsbereiche für autonome Systeme fördern

Der Haupttreiber für autonome Systeme und deren Teiltechnologien ist derzeit das autonome Fahren. Eine nützliche Systemreife zumindest für das teilautonome Fahren scheint bereits erreicht bzw. in greifbarer Nähe zu sein. Dagegen befinden sich andere Anwendungsgebiete, wie z.B. autonome Schiffe und Hafenanlagen, autonome Gebäude, smarte (autonome) Energienetze, Smart City, autonome Planungs- und Assistenzsysteme, etc. noch im Prototypen- oder gar Ideenstadium. Dennoch können sich aus diesen Anwendungsgebieten bedeutende Marktchancen für deutsche Unternehmen ergeben.

Trotz der Gemeinsamkeiten der notwendigen Komponenten hat jedes Anwendungsgebiet für autonome Systeme seine eigene spezifische Komplexität mit unterschiedlichen Anforderungen an Zusammensetzung und Auslegung der Einzelkomponenten. Beispielsweise lassen sich Komponenten und Systeme für autonomes Fahren nicht ohne weiteres auf andere Anwendungsbereiche übertragen, so dass Anpassungen bzw. anwendungsspezifische Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen nötig werden. Die heute bestehenden, technischen Grenzen von Systemen und Anwendungsgebieten werden in vielen Bereichen durch eine intensive Vernetzung zunehmend verschwimmen. Beispielsweise hat der Einsatz von Technologien wie das maschinelle Lernen das Ziel, Roboter autonomer zu gestalten und diese neben dem industriellen Umfeld auch

in menschenfeindlichen, pflegerischen oder medizinischen Anwendungsbieten einzusetzen. Auch am Beispiel eines autonomen Gebäudes wird deutlich, wie die bisherigen Systemgrenzen verschwimmen. Denn aus Sicht der Bewohner werden autonome Gebäude zunehmend zu einem Drehpunkt zwischen autonomen Komfort- und Unterstützungsfunktionen im Gebäude, autonomen Fahrzeugen, autonomen Logistikdiensten, autonomem öffentlichem Nahverkehr, smarten Mobilitätslösungen, smarten medizinischen Diensten, intelligenten Energienetzen und verschiedensten autonomen, rein digitalen Services. Große Entwicklungspotenziale werden daher in Konzepten für das sinnvolle Zusammenspiel unterschiedlichster autonomer Systeme gesehen.

Auch autonome, rein software-definierte Systeme wie Planungswerkzeuge, Entscheidungsunterstützungssysteme, Assistenzsysteme, Systeme zur autonomen Zusammenstellung von digitalen Diensten, oder medizinische Dienste zur Erkennung von Notfallsituationen werden den Menschen in vielen Situationen unterstützen können. Aufgrund ihrer breiten Einsatzmöglichkeiten bieten autonome Software-Systeme auch außerhalb des autonomen Fahrens ein sehr großes Marktpotenzial für die deutsche Wirtschaft.

Handlungsempfehlung: Es sollte eine Konsolidierung sowie Integration der Förderpolitik angestrebt werden, die neben der derzeit starken Fokussierung auf das autonome Fahren auch andere Anwendungsfelder sowie vor allem auch gemeinsame, systemübergreifende Fragestellungen adressiert. Die technologische Breite autonomer Systeme mag dabei zu einer anwendungsgetriebenen Förderung, die stets alle Aspekte in den jeweiligen Einzelprojekten vereint, verleiten. Zielführender wäre aus Sicht der Studienautoren die Entwicklung einer Roadmap, um die jeweiligen Forschungsbedarfe, wie beispielsweise zu Künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen, und entsprechender Instrumente entlang der gesamten förderpolitischen Kette identifizieren zu können. Ein Förderprogramm, welches die komplexe Systemintegration autonomer Systeme sowie die notwendigen Entwicklungs- und Simulationswerkzeuge anwendungsübergreifend adressiert, sollte insbesondere auch Fragestellungen zu interdisziplinärer Kollaboration und ganzheitlichem Systemdenken beinhalten.

4.2 Kompetenzen bei Systementwicklung und -integration aufbauen

Autonome Systeme sind Gegenstand intensiver Forschung. Die Forschungsaktivitäten finden dabei auf mindestens zwei Ebenen statt. Einerseits bei der Erforschung und Weiterentwicklung der einzelnen technologischen Komponenten, wie z.B. Sensorik, maschinelles Lernen, Multiagentensysteme, etc. und andererseits bei der Integration der Komponenten zu autonomen Systemen, die weit über das einfache Zusammensetzen von Einzelkomponenten hinausgeht, so dass umfassendes Wissen zur sinnvollen Systemintegration aufgebaut werden muss. Insbesondere Modularität und die Ableitung von Eigenschaften des Gesamtsystems aus den Eigenschaften der einzelnen Komponenten sind hier wesentliche Aspekte. Die zur industriellen Entwicklung und dem operationellen Einsatz notwendigen Prozesse, Entwicklungsplattformen, virtuellen Entwicklungs- und Simulationstechniken und entsprechende Engineering-Werkzeuge befinden sich gerade erst im Aufbau. Ihre Verfügbarkeit ist jedoch essentiell, um die Entwicklung und den Einsatz autonomer Systeme auf eine breitere industrielle Basis zu stellen. Gleichzeitig ergeben sich für die Entwicklungs- und Simulationswerkzeuge, angepasste virtuelle Techniken sowie das ent-

sprechende Prozesswissen hohe Markt- und Wertschöpfungspotenziale für die deutsche Industrie.

Handlungsempfehlung: Deutsche Unternehmen haben durch Entwicklungen im Bereich Industrie 4.0 sowie den breiten Einsatz virtueller Techniken bereits umfassende Erfahrungen und Systemkompetenzen im Einsatz von digitalen Engineering-Werkzeugen in Produktentwicklung, Produktionsplanung und -steuerung erworben. Damit die Entwicklung zuverlässiger, alltagstauglicher autonomer Systeme auf eine breitere industrielle Basis gestellt werden kann, die auch kleinere und mittelständische Unternehmen in die Lage versetzt, die Komplexität autonomer Systeme zu beherrschen und sie in eigenen Produkten und Dienstleistungen einzusetzen, ist eine Weiterentwicklung dieser Engineering-Werkzeuge und Methoden essentiell, so dass hier ein sehr hoher Förderungsbedarf gesehen wird. Die Förderung sollte aus Sicht der Studienautoren in größeren, industriegetriebenen und branchenübergreifenden Verbundprojekten stattfinden, die anhand von Anwendungsszenarien entsprechende Methoden und Werkzeuge entwickelt und breit erprobt.

Eine zielgerichtete Förderung sollte auch die Ausbildung von Fachkräften umfassen, in der die Aspekte einer sinnvollen Anwendung der einzelnen technischen Komponenten sowie der Systemintegration stärker berücksichtigt werden. Hierzu sind entsprechende berufliche Aus- und Weiterbildungskonzepte sowie im akademischen Bereich Studiengänge erforderlich, die das breite Themenspektrum, welches für den Kompetenzaufbau im Bereich der Systemintegration erforderlich ist, abdecken.

4.3 Anforderungen und Konzepte zum Zusammenspiel von Mensch und autonomen Systemen erforschen

Autonome oder teilautonome Systeme können aus vielerlei Gründen von bisherigen Erwartungen und langjährig erlernten Verhaltensmustern, wie das Anhalten an einer roten Ampel oder an einem Zebrastreifen, abweichen. Menschen haben beispielsweise gelernt, die Straße nicht zu überqueren, wenn sich ein Fahrzeug mit einer als zu hoch eingeschätzten Geschwindigkeit nähert. Im Rahmen des Einsatzes autonomer Fahrzeuge müssen Menschen sich zunächst an mögliche neue Verhaltensmuster gewöhnen und diese als zuverlässig einordnen. Hierzu ist es erforderlich, dass sich derartige Verhaltensmuster auch durchgängig und herstellerübergreifend nachvollziehen lassen, um Fehlbedienungen, Unfälle und Missverständnisse zu vermeiden. In diesem Kontext ist auf die zentrale Rolle der Interaktion des Menschen mit autonomen Systemen hinzuweisen. Beispielsweise untersuchen aktuelle Forschungsarbeiten, wie autonome Systeme die typische nonverbale Mensch-Mensch-Kommunikation erlernen könnten. Weitere Untersuchungen zielen auf die Entwicklung von Kommunikationsstrategien ab, die das zu erwartende Verhalten eines autonomen Systems situationsangepasst und eindeutig an den Menschen kommunizieren können.

Handlungsempfehlung: Einerseits muss ein autonomes System hinsichtlich Nutzbarkeit und Transparenz so gestaltet sein, dass es sich an den Kompetenzen des Menschen orientiert. Andererseits müssen die Menschen den Umgang mit autonomen Systemen und die Erkennung von

möglichen Fehlerfällen erst erlernen. Die Gestaltung der Interaktion wird sich dabei stark an den Anforderungen in spezifischen Anwendungsgebieten orientieren müssen. Neben Entwicklungsanstrengungen, die sich auf die Verlässlichkeit sowie ein herstellerübergreifendes, nachvollziehbares Systemverhalten fokussieren sollten, ist zudem ein umfassender Dialog notwendig, wie das veränderte Zusammenwirken von Mensch und Maschine möglichst reibungslos gestaltet werden kann.

4.4 Forschung zur Interaktion autonomer Systeme mit niedriger automatisierten Systemen sowie dem daraus resultierenden Mischbetrieb initiieren

Die aktuellen Einschätzungen, wann nur noch vollständig autonome Systeme auf Straßen, Schienen oder in Fabrikumgebungen eingesetzt werden können, divergieren stark. Manche Experten gehen davon aus, dass solche Systeme innerhalb von wenigen Jahren verfügbar sein werden, andere wiederum postulieren, dass dieser Zielzustand niemals erreicht wird. In jedem Fall wird es in den kommenden Jahren in vielen Anwendungsgebieten zu einem Mischbetrieb aus Systemen mit unterschiedlichen Automatisierungsstufen (Abbildung 2) kommen, deren Zusammenspiel eigene Herausforderungen mit sich bringt.

Handlungsempfehlung: Das Zusammenspiel von Systemen unterschiedlichster Automatisierungs- und Intelligenzniveaus muss so gestaltet werden, dass Fehlentscheidungen, Unfallgefahren und Ineffizienzen weitestgehend vermieden werden. Hierzu ist eine gezielte Forschung notwendig, die anhand von Pilotvorhaben anwendungsspezifisch Konflikt- und Gefahrenpotenziale systematisch untersucht und die Anwender bei der Einführung eines solchen Parallelbetriebs unterstützt. Pilotvorhaben, in denen (teil-) autonome Systeme in bestehende Infrastrukturen eingeführt und notwendige Maßnahmen für die Herstellung eines funktionierenden Mischbetriebs aufzeigt werden, sollten unter wissenschaftlicher Begleitung entsprechende Leitfäden entwickeln. Der Erforschung von virtuellen Simulationsverfahren, die in der Lage sind, ein längerfristiges Systemverhalten im Mischbetrieb und in unterschiedlichen Situationen zu simulieren, kommt hierbei eine sehr große Bedeutung zu.

Neben technischen Lösungen gilt es außerdem, entsprechende Standards, Zertifizierungen und gesetzliche Regelungen zu entwickeln. Dies gilt nicht nur für den Anwendungsbereich autonomes Fahren, sondern für alle Bereiche, in denen Systeme unterschiedlichster Intelligenz- bzw. Automationsniveaus sinnvoll, sicher und effizient zusammenspielen müssen. So sind konsistentes Verhalten bzw. entsprechende Benutzerschnittstellen oft wichtiger zu bewerten als die neueste Funktionalität.

4.5 Forschung zur Interaktion verschiedener autonomer Systeme miteinander sowie mit der Infrastruktur stärken

Autonome Systeme ermöglichen völlig neue Anwendungsszenarien, die bisher weitgehend getrennte Bereiche miteinander verbinden. Daraus entstehen umfangreiche Berührungspunkte verschiedenster autonomer Systeme sowie auch mit der umgebenden Infrastruktur. Es werden daher

Methoden und technische Regeln benötigt, die ein sinnvolles, sicheres und effizientes Zusammenspiel sicherstellen, um die vorgesehenen Aufgabenstellungen bestmöglich zu erfüllen. Es gilt die umfassenden Herausforderungen an die Interoperabilität, die sich aus diesem Zusammenspiel ergeben, zu adressieren. Aber auch Fragen zur Umsetzung des jeweiligen autonomen Verhaltens, ob dieses beispielsweise „aggressiver“ oder „defensiver“ gestaltet ist, müssen geklärt werden. Denkbar sind Hierarchien für die Übermittlung von „Anweisungen“ an untergeordnete Systeme, wie z.B. ein autonomes Verkehrsleitsystem an ein autonomes Fahrzeug, eine Smart City an ein autonomes Gebäude, ein Energienetz an ein autonomes Klimatisierungssystem, etc.

Des Weiteren bedarf die Schaffung einer geeigneten Infrastruktur sowie von Systemen, die resilient auf Ausfälle, Hackerangriffe bzw. Nichterreichbarkeit der notwendigen Umgebungsinfrastruktur reagieren, weiterer Anstrengungen. Hierzu sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig, die untersuchen, welche Funktionen und Informationen von einer umgebenden Infrastruktur notwendig bzw. sinnvoll für das Funktionieren eines autonomen Systems sind. Zudem sind Ausfall- und Sicherheitsstrategien notwendig, die fehlende Informationen substituieren oder aber dedizierte Notfallprogramme auslösen, um die Kontrolle an den Menschen abzugeben oder Systeme in einen sicheren Zustand bzw. sicheres Verhalten zu überführen.

Handlungsempfehlung: Die systematische Erforschung der Interaktion autonomer Systeme untereinander sowie mit niedriger automatisierten Systemen und der Infrastruktur erfordert stets funktionsfähige Gesamtsysteme in ihren jeweiligen Anwendungsdomänen. So könnten für Anwendungsszenarien im Bereich Energieeffizienz beispielsweise eine autonome Gebäudesteuerung, niedriger automatisierte Geräte im Gebäude, (autonome) Elektrofahrzeuge, teilautonome Heizungs- und Klimatisierungssysteme, Photovoltaikanlagen, lokale Energiespeicher, verschiedene rein digitale Dienste (Netzauslastungen, Wettervorhersagen, Kalender) sowie ein autonomes, externes Energienetz zusammengeführt werden, um eine erheblich höhere Energieeffizienz im Gebäudekontext zu erreichen. Das Beispiel zeigt, dass u.U. sehr viele verschiedene Teilsysteme aus ganz unterschiedlichen Fachbereichen beteiligt sind. Dabei sind Aspekte wie standardisierte System- und Entscheidungshierarchien, eine geordnete Informationsweitergabe zwischen autonomen Systemen, Angriffs- und Absicherungsmöglichkeiten, etc. interessant. Auch mit Blick auf die Infrastruktur müssen neben den eigentlichen, technischen Infrastrukturkomponenten Aspekte wie die Vernetzung sowie auch hier die Absicherung gegen Ausfälle und Angriffe von außen berücksichtigt werden.

Daher sind mehrere größere, interdisziplinäre Forschungsverbünde wünschenswert, die in entsprechend übergreifenden Pilotprojekten die Interaktion verschiedenster autonomer Systeme miteinander und mit niedriger automatisierten Systemen in einem gemeinsamen, neuen Anwendungskontext untersuchen. Der Aufbau von Testfeldern im Rahmen des autonomen Fahrens zur Klärung der notwendigen Funktionen und Informationen der umgebenden Infrastruktur sowie zur Evaluation des Zusammenspiels autonomer Fahrzeuge kann als Vorbild für andere Anwendungen und Testumgebungen dienen.

4.6 Forschung zum Umgang mit maschinellem Lernen und zu der standardisierten Weitergabe des so erzeugten Wissens initiieren

Eine weitere Herausforderung, die in vielen Publikationen diskutiert wird, ergibt sich aus der Frage, welche autonomen Systeme wann selbstlernen sollen und ob daraus ein unerwünschtes Systemverhalten entstehen kann. Gerade das verlässliche Verhalten über Hersteller- und auch Ländergrenzen hinweg hängt hiermit eng zusammen. Konkret wird beispielsweise diskutiert, wie autonome Fahrzeuge an die jeweiligen, regionalspezifischen Verhaltensweisen im Straßenverkehr angepasst werden können, um vielerorts eine Senkung der Unfallgefahr zu ermöglichen. Ebenso wird diskutiert, wie mit unterschiedlichem Wissen von autonomen Fahrzeugen in einer bestimmten Region umgegangen werden soll bzw. wie sich dieses Wissen schnell und effizient auf alle Fahrzeuge verteilen ließe. Insgesamt lassen die Herausforderungen im Umgang mit gelerntem Wissen erkennen, dass die Selbstlernfunktionen eines autonomen Systems eine Angriffsfläche für Missbrauch darstellen. Beispielsweise konnten mehrere Forschungsgruppen zeigen, dass schon einfache Veränderungen an Verkehrsschildern deren Erkennungsrate durch autonome Fahrzeuge drastisch senken.

Handlungsempfehlung: Die Selbstlernfähigkeit ist für das Funktionieren eines autonomen Systems zentral, wirft aber noch große Forschungsfragen auf. Einerseits gilt es zu klären, wie Missbrauch sowie ungewolltes, eigenständiges Verhalten autonomer Systeme vermieden werden kann. Analog zu etablierten Ansätzen aus der IT-Security (z.B. Penetration Testing), müssen Verfahren entwickelt werden, die auf Basis gezielter Manipulationsversuche aufzeigen können, ob und wo Angriffsvektoren für autonome Systeme vorliegen. Hier stellen sich Fragen der Absicherung, Transparenz und Erklärbarkeit von autonomen Systemen und der Methodik, diese sicherstellen zu können. Andererseits muss erforscht werden, wie ein sicherer Austausch von Wissen über eine Vielzahl von Systemen sowie auch über Hersteller- und Ländergrenzen hinweg ermöglicht werden kann. In diesem Kontext müssen auch Fragen zur Verfügbarkeit des Wissens, d.h. offene oder proprietäre Lösungen bzw. Austausch zwischen ihnen, diskutiert werden. Eine wesentliche Frage ist hier auch, in wie weit es eine Gesellschaft sich erlauben kann, dass und welche Daten und Methoden nicht öffentlich verfügbar sind und daher einer breiten gesellschaftlichen Diskussion und Forschung ggf. nicht zur Verfügung stehen.

4.7 Forschungsanstrengungen zu Simulation, Zertifizierung und Verifikation stärken

Der Einsatz autonomer Systeme ist mit Risiken verbunden, die sich beispielsweise aus technischen Problemen, einer unzureichenden Wissensbasis, fehlerhaften Handlungsplänen sowie daraus resultierend, einem unerwarteten Verhalten ergeben können. Bei der Entwicklung autonomer Systeme müssen diese Risiken vor einem Einsatz in realen Umgebungen erkannt, evaluiert und abgesichert werden. Daher kommt einer umfassenden Simulation, Zertifizierung und Validierung eine hohe Bedeutung zu. Dies gilt nicht nur für das autonome Fahren, sondern auch für Anlagen und Roboter im industriellen Umfeld sowie bei Assistenzsystemen im direkten Kontakt mit Menschen. Ebenso sind verlässliche Funktionalitäten und sinnvolles Verhalten auch bei Gebäuden nötig. Energienetzbetreiber benötigen Kenntnis über das Verhalten autonomer Gebäude, autonome Fahrzeuge müssen sicher mit einem Smart Home interagieren können und medizini-

sche Dienste müssen sich auf den Wahrheitsgehalt von autonom veranlassten Notrufen verlassen können. Auch in der Produktion dürfen keine Effizienzeinbußen entstehen, weil sich autonome Systeme unerwartet verhalten.

Handlungsempfehlung: Der Einsatz autonomer Systeme im unmittelbaren Umfeld des Menschen kann das Risiko bergen, die menschliche Gesundheit und das Leben empfindlich zu beeinträchtigen. Zuverlässige Absicherung und Zertifizierungen sind daher eine unerlässliche Voraussetzung und Forschungsanstrengungen sollten sich auf die bislang fehlenden standardisierten Simulations- und Prüfverfahren für autonome Systeme (beispielsweise ähnlich eines TÜVs) konzentrieren. Wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, werden die notwendigen Simulationsverfahren und Engineering-Werkzeuge als Weiterentwicklung der virtuellen Techniken verstanden.

4.8 Lücken in der Förderung der Cyber-Security schließen

Die Herausforderungen an die Cyber-Security sind gerade beim Einsatz autonomer Systeme, die in der Regel mit anderen Systemen und über das Internet vernetzt sind, enorm. Denn Experteneinschätzungen zufolge muss davon ausgegangen werden, dass beispielsweise autonome Fahrzeuge nicht nur attraktive Ziele für Hackerangriffe bieten¹⁰⁴, sondern dass diese auch nicht vermieden werden können. Denn wie in vielen anderen Bereichen kann auch in der IT-Sicherheit eine hundertprozentige Sicherheit nicht garantiert werden, insbesondere vor dem Hintergrund, dass mit zunehmender Vernetzung auch die Zahl der potenziellen Angriffspunkte steigt. Hinzu kommt, dass viele Fehler in diesem Bereich nach wie vor durch menschliches Versagen entstehen. Entsprechend muss beim Entwurf von IT-Sicherheitslösungen für autonome Systeme die Benutzbarkeit bereits beim Entwurf der Lösungen mitgedacht werden.

Des Weiteren steigen die Anforderungen an Sicherheitslösungen mit zunehmender Komplexität. So sollen beispielsweise in der Industrie 4.0 Mensch, IT-Systeme und teilweise autonom agierende Systemkomponenten hochgradig miteinander vernetzt werden. Zudem sind mehr Akteure entlang der Wertschöpfungskette beteiligt, wenn z.B. zusätzlich datengetriebene Dienstleistungen gemeinsam mit Partnern in digitalen Ökosystemen angeboten werden. Sicherheit ist jedoch eine Eigenschaft des Gesamtsystems. Werden zunehmend vernetzte und autonome Komponenten Teile des Systems, dann gilt es, dieses in das Gesamtkonzept mit einzubeziehen.

Handlungsempfehlung: Es gilt die umfassenden Herausforderungen an die Cyber-Security, die sich aus dem Einsatz autonomer, vernetzter Systeme ergeben, umfassend zu adressieren. Einerseits sollte IT-Security als Entwurfsprinzip bei der Entwicklung autonomer Systeme von Beginn an beachtet werden. Andererseits muss neben dem Design vor allem die Implementierung in den Fokus genommen werden, an der die meisten Sicherheitslösungen derzeit noch scheitern.

¹⁰⁴ Vgl. Sokolov 2015.

4.9 Geeignete Förderkonzepte entwickeln

Aufgrund der immensen Komplexität des sozio-technischen Gesamtsystems „Autonomes System“ sind langfristige angelegte Förderungen wünschenswert, die es deutschen Unternehmen und Forschungseinrichtungen ermöglichen, eine weltweite Führungsposition im jeweiligen Teilthema und/oder Anwendungsfeld zu erarbeiten. Die Aufgaben sind dabei so groß, dass selbst die finanziell und personell vorzüglich ausgestatteten Internetkonzerne dies nicht im Alleingang lösen können. Hier liegt eine Chance für die deutsche Industrie mit ihren gut etablierten Kooperations- und Zulieferstrukturen, die eine arbeitsteilige Herangehensweise an die vielfältigen Problemfelder erlauben.

Die technisch-wissenschaftlichen Problemstellungen sind dabei auf mindestens zwei Ebenen angesiedelt. Zum einen sind nennenswerte Forschungsanstrengungen bei den Einzeltechnologien und hier vor allem beim maschinellen Lernen, IT-Sicherheit sowie geeigneten Simulationsverfahren notwendig. Zum anderen müssen autonome Systeme in ihrem Zusammenspiel mit dem Menschen, anderen autonomen Systemen, niedriger automatisierten Systemen sowie mit der Infrastruktur untersucht und simuliert werden. Der eher integrierende Ansatz ist bereits jetzt im Umfeld des autonomen Fahrens gut zu beobachten. Nun gilt es, diese Strukturen auch auf andere Anwendungsgebiete zu übertragen und wie bereits beschrieben, größere anwendungsspezifische Forschungsverbünde und Pilotprojekte zu fördern, die unter Einbeziehung der industriellen Anwender spezifische Anforderungen und Lösungsansätze erforschen. Ein wichtiger Bestandteil der Forschung sind auch hier virtuelle Simulationsverfahren, die in der Lage sind, autonome Systeme im Zusammenspiel mit unterschiedlichsten Randbedingungen zu simulieren. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist der Aufbau entsprechender, gemeinsamer Wissensbasen für autonome Systeme, um ein Zusammenspiel mit standardisierten Trainingsdaten initiieren und beurteilen zu können. In jedem Fall sollten die Endnutzer frühzeitig mit einbezogen werden, denn Autonomie ohne erkennbaren Mehrwert wird keine Akzeptanz erzeugen.

Handlungsempfehlung: Es ist zusammenfassend darauf zu achten, dass die gesellschaftliche und gesetzgeberische Diskussion frühzeitig angestoßen wird, um praktikable Regelungen für die Einführung und den Einsatz autonomer Systeme zu etablieren. Gleichfalls sollten vielversprechende Anwendungsgebiete zeitnah und umfassend unterstützt werden, um das notwendige Know-How sowie Entwicklungsprozesse und Werkzeuge aufzubauen mit dem Ziel eine gute Ausgangsposition auf dem Weltmarkt zu erreichen. In diesem Kontext gilt es die Herausbildung eines eigenen anwendungsunabhängigen Forschungsbereichs für autonome Systeme mit Fokus auf systemische Autonomie, Systemtheorie, Systemtechnik, und Systementwicklungsmethodik (Systems Engineering) zu unterstützen und dadurch den Aufbau von notwendigen Kompetenzen und Fachkräften zu sichern.

4.10 Impulse für KI-Forschungsplattform(en) setzen

Insgesamt ist während der Recherche für die vorliegende Studie deutlich geworden, dass ein Großteil der Forschung, Entwicklung und vor allem auch der Datensammlung heute in der Privatwirtschaft erfolgt. So werden zum Beispiel gerade die Technologien des autonomen Fahrens

überwiegend im industriellen Kontext erforscht und stehen demnach der Allgemeinheit zunächst nicht zur Verfügung. Wichtige Fragen, wie zum Austausch von maschinell gelerntem Wissen, zu effektiven Simulationsumgebungen, allgemeingültigem Systemverhalten, wertneutral trainierten autonomen Systemen, Zertifizierungsstrategien, etc. werden derzeit kaum diskutiert, da es entsprechende Austauschplattformen auf nationaler und europäischer Ebene bisher nicht gibt.

Öffentliche und vor allem offene Forschungsplattformen könnten für autonome Systeme sinnvoll sein, um technische, aber auch gesellschaftliche Aspekte gemeinschaftlich zu evaluieren, mögliche Lösungswege zu entwickeln und notwendige Standardisierungen anzugehen. In anderen Forschungsdisziplinen werden gemeinsame Forschungs- oder Standardisierungsplattformen seit vielen Jahren sehr erfolgreich eingesetzt, z.B. mit dem europäischen Forschungszentrum CERN in der Physik oder dem World Wide Web Consortium (W3C) im Bereich des Web.

Handlungsempfehlung: Auf Basis der im Verlauf dieser Studie deutlich gewordenen Anforderungen, die durch autonome Systeme entstehen, ist zu überlegen, welche Technologien zur Umsetzung notwendig sind, welche spezifischen wissenschaftlichen und technologischen Anforderungen sich daraus ergeben, welche Standardisierungen nötig sind, welche Kommunikationsanforderungen bestehen und in welchen Organisationsformen sich diese Aspekte umsetzen ließen. Die Studienautoren vertreten aufgrund der potenziellen Eigenschaften autonomer Systeme und der sich daraus ergebenden technologischen und gesellschaftlichen Tragweite die Ansicht, dass grundlegende Technologien sowie auch grundlegendes, maschinell gelerntes Wissen weitgehend öffentlich zugänglich sein und breit diskutiert werden sollten. Einer entsprechenden, offenen Austausch- und Forschungsplattform kommt daher eine sehr große Bedeutung zu.

4.11 Fragen zu rechtlichen und ethischen Rahmenbedingungen frühzeitig adressieren

Zentrale Herausforderungen ethischer und rechtlicher Natur ergeben sich aus der Selbstlernfähigkeit autonomer Systeme. Denn durch die Selbstlernfähigkeit verliert der Hersteller nach Inbetriebnahme eines autonomen Systems teilweise die Kontrolle darüber, was das System lernt und welche Schlussfolgerungen daraus gezogen werden. Die gegenwärtige Forschung zeigt auf, dass hier durchaus unerwünschtes oder mindestens unerwartetes Systemverhalten entstehen kann, welches sich auch gegen den Menschen wenden kann. Einhelligkeit, sowohl aus juristischer wie ethischer Perspektive, besteht darüber, dass die Maschinen selbst keine Verantwortung für ein solches Verhalten übernehmen können.

Weil autonome Systeme von sich aus nicht in der Lage sind, moralische Entscheidungen zu treffen bzw. ihre Entscheidungen nach moralischen Maßstäben zu beurteilen, richten sich die ethischen Anforderungen vielmehr auf den Prozess der Programmierung, in den ethische Grundüberlegungen einfließen. So gilt es hier beispielsweise verfassungsrechtliche Regeln wie die Unantastbarkeit der Menschenwürde, die Integrität von Leib und Leben oder den allgemeinen und speziellen Gleichheitsgrundsatz zu beachten. Auch das Erfassen sowie der Umgang und Schutz personenbezogener Daten, die für den Aufbau der Wissensbasen autonomer Systeme benötigt werden, muss frühzeitig adressiert werden.

In rechtlicher Hinsicht gibt es für autonome, selbstlernende und generell für technische Systeme jeweils ein „erlaubtes Risiko“, das beispielsweise in einem Schadensfall das Kriterium der Fahrlässigkeit ausschließen kann. Dennoch herrscht Uneinigkeit darüber, wie weit das erlaubte Risiko reicht. Tritt durch maschinelles Handeln ein Schadensfall ein, so kann in der Frage der Haftung das Kriterium der Fahrlässigkeit oft nicht nachgewiesen werden. Insbesondere, wenn diesem Handeln Selbstlernprozesse vorausgehen ist es schwer, die Fahrlässigkeit einem konkreten Menschen zuzuordnen. Somit entstehen Haftungslücken.

Handlungsempfehlung: Es sind tiefgreifende Forschungsanstrengungen zu Vorhersagemethoden, Validierung/Verifizierungen oder auch zur Selbsterklärungsfähigkeit notwendig, um im Falle eines Unfalls die Entscheidungen autonomer Systeme bei der Klärung von Schuldfragen nachvollziehen zu können. In Bezug auf den Datenschutz sind entsprechend verbindliche, gesetzliche Regulierungen zu definieren und mit Zertifizierungsmethoden zu überprüfen. Gleichzeitig gilt es bestehende Haftungslücken zu schließen und Fragestellungen in Bezug auf gemeinsame europäische zivilrechtliche Regelungen zu klären.

4.12 Gesellschaftliche Aspekte frühzeitig adressieren

Die Einführung autonomer Systeme kann in vielen Lebensbereichen mit großen Chancen für die Gesellschaft und den einzelnen Menschen verbunden sein. Der Mobilitätssektor kann flexibler, kosteneffizienter, sicherer sowie umwelt- und klimaschonender gestaltet werden und älteren Menschen eine größere soziale Teilhabe ermöglichen. Im Bereich der industriellen Produktion kann der Einsatz autonomer Systeme dazu beitragen, eine erheblich flexiblere Automatisierung zu erreichen und eine wandlungsfähige Produktion im Sinne von Industrie 4.0 umzusetzen. Das Smart Home kann künftig als dezentraler Knoten im Energienetz und intelligente Komponente im Smart Grid die Energieeffizienz im Wohnumfeld erhöhen und dazu beitragen, die Energienetze zu stabilisieren. Gleichzeitig können Roboter in der Pflege oder im medizinischen Bereich das Fachpersonal gezielt bei schwierigen Aufgaben unterstützen, während sie beim Einsatz in menschenfeindlichen Umgebungen, wie zum Beispiel bei Rettungseinsätzen, Menschenleben direkt schützen können.¹⁰⁵

Gleichzeitig wird die Einführung autonomer Systeme aber auch mit Risiken verbunden sein, die es frühzeitig zu adressieren gilt. Denn neben offenen Fragen wie zur Schadenshaftung, der Rolle des Datenschutzes oder der Cyber-Security gibt es wichtige ethische Fragestellungen, die derzeit noch nicht umfassend genug adressiert werden (siehe dazu Handlungsempfehlung 4.12). Der transparente Umgang mit diesen Fragen, auch um zu klären, was die Gesellschaft von autonomen Systemen erwartet, was ihnen erlaubt werden sollte und was nicht zugelassen werden darf, ist für einen differenzierten und informierten Diskurs zentral.

Handlungsempfehlung: Da die gesellschaftliche Akzeptanz neuer Technologien eine wesentliche Voraussetzung für deren Erfolg ist, sollten die derzeit zu beobachtenden Ängste im Umgang mit autonomen Systemen, auch mit Blick auf die potenziell möglichen, gegen den Menschen

¹⁰⁵ Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017

gerichteten Entscheidungen autonomer Systeme, keinesfalls ignoriert und begleitend zu der technologischen Forschung untersucht und adressiert werden. Begleitend dazu sollte der offene gesellschaftliche Diskurs weiter gestärkt werden, mit dem Ziel eine informierte Debatte zu den Chancen und Risiken autonomer Systeme zu ermöglichen.

4.13 Neue Geschäftsmodelle und internationale Abhängigkeiten identifizieren

Es wird erwartet, dass autonome Systeme die Weiterentwicklung sowohl existierender Industrien und Dienstleistungen als auch die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle sehr stark befördern. Neben den derzeitigen Hauptanwendungsgebieten autonomes Fahren und autonome Robotik können beispielsweise die Entwicklungen hin zu autonomen, elektrisch betriebenen Frachtschiffen nebst entsprechend ausgestatteten Hafenanlagen deutschen Werften und Häfen neue Betätigungsfelder ermöglichen. Auch vernetzte und (teil-) autonom agierende Mobilitätslösungen können ein erhebliches Marktpotenzial erbringen. Ähnliches gilt für digitale Karten und Lokalisierungssysteme, da detaillierte, hochgenaue Karten in vielen Anwendungsgebieten Anwendung finden können. Auch hier sind große Marktpotenziale vorstellbar. Derzeit ist jedoch nicht absehbar, in welchen Anwendungsgebieten die größten Entwicklungspotenziale und gesellschaftlichen Nutzen liegen und in welchen Gebieten eine gesellschaftliche Akzeptanz erreicht werden kann.

Wie in Abschnitt 2.2 und 2.3 herausgearbeitet, zeigen sich Trends zur weltweiten Arbeitsteilung und Schwerpunktbildung bei den einzelnen, für autonome Systeme relevanten Technologien und Geschäftsinteressen. So scheint sich beispielsweise derzeit die Entwicklungskompetenz im Bereich industriell nutzbarer Programmierumgebungen für maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz stark auf die großen IT-Konzerne zu konzentrieren. Anwendungsentwickler nutzen diese im Kontext ihrer Produkt- oder Systementwicklung^{106,107}. Aufgrund der technischen Komplexität autonomer Systeme könnten somit unter Umständen unerwünschte Abhängigkeiten entstehen, wenn deutsche Unternehmen Komponenten, Wissensbasen, etc. in ihren eigenen Produkten einsetzen aber keinen Einfluss darauf haben, wie die Komponenten weiterentwickelt und verfügbar gehalten werden.

Handlungsempfehlung: Die Entwicklung autonomer Systeme wird stark durch erfolgversprechende Geschäftsmodelle und eine zunehmende Service-Orientierung getrieben. Dienste und Geschäftsmodelle sollten industriepolitisch stärker fokussiert werden, um einen systemischen Nachteil Deutschlands zu vermeiden. Die Forschungsförderung für neue disruptive Erfolgsfaktoren sollte sich daher auch volkswirtschaftlich ausrichten, indem Gründungen vereinfacht, die Ausbildung gestärkt und die Entwicklung relevanter Technologien wie beispielsweise Cloud-Plattformen unterstützt werden. Die Studienautoren empfehlen, die Marktpotenziale autonomer Systeme anwendungsspezifisch in entsprechenden Marktstudien zu evaluieren.

Um die technologische Souveränität Deutschlands zu gewährleisten, sollten internationale Abhängigkeiten vor allem bei sicherheits- oder systemkritischen Komponenten autonomer Systeme

¹⁰⁶ Vgl. Pakalski 2017.

¹⁰⁷ Vgl. Wilkens 2017.

frühzeitig identifiziert werden. Hierzu ist ein sorgfältiger Evaluationsprozess anzustoßen, welcher essentielle Technologien und die jeweiligen Abhängigkeiten untersucht und gegebenenfalls Vorschläge zur Verringerung der Abhängigkeiten macht. Entsprechende Maßnahmen schließen die Förderung relevanter Technologiebereiche sowie eine Stärkung des Wissenstransfers mit ein, wie beispielsweise Anreize für industrielle Forschung oder eine konzertierte Zusammenarbeit im Rahmen von Plattformen (Netzwerkbildung, Kooperationen, Akteursbündelung).

4.14 Weiterführung der Evaluation

Die hier vorliegende Studie kann nur einen ersten Einblick in das komplexe Thema autonomer Systeme geben. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die Anforderungen und Technologien in den verschiedenen, denkbaren Anwendungsfeldern sich stark voneinander unterscheiden.

Handlungsempfehlung: Wie mehrfach im Text beschrieben, sehen die Studienautoren erhöhten Bedarf an vertiefenden, längerfristigen Studien zu Teilaspekten autonomer Systeme. Wesentliche Aufgaben sind die domänenspezifischen Anforderungen herauszuarbeiten und die bisherigen „Themensilos“ aufzubrechen und im Sinne der Systemintegration gesamtheitlich zu betrachten. Auch die Forderung nach einer Forschungsplattform sollte Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein.

Literaturliste

ADAC 2016

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club: *ADAC-Umfrage „Autonomes Fahren“*, November 2016. URL:

https://www.adac.de/_mmm/pdf/Umfrage%20Autonomes%20Fahren%20Nov%202016%20adac.de_281295.pdf [Stand: 05.10.2017].

Airbus 2017

A³ by Airbus: Vahana: The next technological breakthrough in urban air mobility, 2017. URL: <https://www.airbus-sv.com/projects/1> [Stand: 05.10.2017]

Arvida 2016

Angewandte Referenzarchitektur für virtuelle Dienste und Anwendungen: *Das Projekt*, 2016. URL: <http://www.arvida.de/> [Stand: 05.10.2017].

Autonomes-Fahren.de 2016a

Autonomes-Fahren.de: „*Amsterdamer Erklärung der EU-Verkehrskonferenz*“, Artikel vom 18. April 2016, URL: <http://www.autonomes-fahren.de/amsterdamer-erklaerung-der-eu-verkehrskonferenz/> [Stand: 05.10.2017].

Autonomes-Fahren.de 2016b

Autonomes-Fahren.de: „*Südkorea: „Erstes Land erlaubt Testen überall & Teslas Einsatz*“, Artikel vom 26. Mai 2016, URL: <http://www.autonomes-fahren.de/suedkorea-erstes-land-erlaubt-testen-ueberall-teslas-einsatz/> [Stand: 05.10.2017].

Barth/IW 2016

Barth, H., Institut der deutschen Wirtschaft Köln (Hrsg.): „Autonomes Fahren, Eine Herausforderung für die deutsche Autoindustrie“. In: *IW-trends* 02.2016.

Beeger 2017

Beeger, B.: „Eine Boygroup für das autonome Fahren“. In: *Frankfurter Allgemeine* (Artikel vom 15.01. 2017). URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/netzkonferenz-dld/dld-2017-mobileye-bmw-und-intel-kooperieren-beim-autonomen-fahren-14661103.html> [Stand: 04.10.2017].

BMBF 2014

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): *Positionspapier der Bundesregierung zur zukünftigen Entwicklung der Mikroelektronik in Deutschland*, Berlin 2014.

BMBF 2016

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Richtlinie über die Förderung zum Themenfeld „Zivile Sicherheit – Innovationslabore/Kompetenzzentren für Robotersysteme in menschenfeindlichen Umgebungen“* im Rahmen des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit 2012 bis 2017“ der Bundesregierung (Bekanntmachung vom 20.07.2016).

BMWI 2016

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *SmartHome2Market: Marktperspektiven für intelligente Heimvernetzung*, Berlin 2016.

Bundesregierung 2017

Bundesregierung: „*Strassenverkehrsgesetz: Automatisiertes Fahren auf dem Weg*“ (Artikel vom 12. Mai 2017). URL: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2017/01/2017-01-25-automatisiertes-fahren.html> [Stand: 04.10.2017].

Cole 2012

Cole E.: “Robot Law: A Global Perspective”. In: *robotics business review* (Artikel vom 24. September 2012). URL: https://www.roboticsbusinessreview.com/consumer/robot_law_a_global_perspective/ [Stand: 04.10.2017].

Condliffe 2016

Condliffe, J.: „Autonom durch die Meere“. In: *heise online* (Artikel vom 2. November 2016). URL: <https://www.heise.de/tr/artikel/Autonom-durch-die-Meere-3378823.html> [Stand: 04.10.2017].

Delius 2016

Delius, M.: „Dieser Roboter lehrt uns menschliche Freiheit“. In: *Die Welt* (Artikel vom 1. März 2016). URL: <https://www.welt.de/kultur/article152773261/Dieser-Roboter-lehrt-uns-menschliche-Freiheit.html> [Stand: 04.10.2017].

Deloitte 2017

Deloitte (Hrsg.): “*What's ahead for fully autonomous driving; Consumer opinions on advanced vehicle technology*”. Perspectives from Deloitte's Global Automotive Consumer Study, 2017

Deutscher Bundestag 2016

Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste: Sachstand: *Servicerobotik und autonomes Fahren, Gesetzliche Regulierung in ausgewählten Ländern*, Aktenzeichen WD 7 -3000 – 129/16.

Dilba 2017

Dilba D.: „Autonome Schiffe: Alle Mann von Bord“. In: *heise online* (Artikel vom 23. Juni 2017). URL: <https://www.heise.de/tr/artikel/Autonome-Schiffe-Alle-Mann-von-Bord-3725761.html> [Stand: 04.10.2017].

DLR 2014

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *Erstes Projekt des Helmholtz-Validierungsfonds erfolgreich bewertet*, 2014. URL: http://www.dlr.de/tm/desktopdefault.aspx/tabid-7986/14962_read-39485/ [Stand: 01.02.2016].

DMV Kalifornien 2017a

State of California Department of Motor Vehicles: *Testing of Autonomous Vehicles*, 2017. URL: <https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/detail/vr/autonomous/testing> [Stand: 04.10.2017].

DMV Kalifornien 2017b

State of California Department of Motor Vehicles: *Deployment of Autonomous Vehicles for Public Operation*, 2017. URL: <https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/detail/vr/autonomous/auto> [Stand: 04.10.2017].

DOT/NHTSA 2016

United States Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration: *Federal Automated Vehicles Policy, Acceleration the Next Revolution in Roadway Safety*, New Jersey, September 2016.

Douglas 2017

Douglas, K.: “2016 Robotics Roadmap and the National Robotics Initiative 2.0”. In: *Computing Community Consortium* (Artikel vom 3. Januar 2017). URL: <http://www.cccb.org/2017/01/03/2016-robotics-roadmap-and-the-national-robotics-initiative-2-0/> [Stand: 04.10.2017].

dpa 2017

Deutsche Presse-Agentur: „Intel zahlt 14 Milliarden Euro für Zulieferer aus Israel“. In: *RP online* (Artikel vom 14. März 2017). URL: <http://www.rp-online.de/wirtschaft/intel-zahlt-14-milliarden-euro-fuer-zulieferer-aus-israel-aid-1.6687368> [Stand: 05.10.2017].

Europäisches Parlament 2017

Europäisches Parlament: Zivilrechtliche Regelungen im Bereich Robotik, Erschließung des Europäischen Parlaments vom 16. Februar 2017 mit Empfehlungen an die Kommission zu zivilrechtlichen Regelungen im Bereich Robotik (2015/2014(INL)), P8_TA(2017)0051.

Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017

Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum (Hrsg.): *Autonome Systeme – Chancen und Risiken für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft*. Langversion, Abschlussbericht, Berlin, April 2017.

FAZ 2016

Frankfurter Allgemeine Zeitung: „*Bahn plant Züge ohne Lokführer*“, Artikel vom 9. Juni 2016, URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/deutsche-bahn-chef-ruediger-grube-plant-zuege-ohne-lokfuehrer-14278928.html> [Stand: 05.10.2017].

Floreano/ Wood 2015

Floreano, D./ Wood, R.J.: “Science, technology and the future of small autonomous drones”. In: *Nature*, 521, 2015, S.460-466.

Fraunhofer IAO/Horváth& Partners 2016

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO / Horváth&Partners (Hrsg.): *The Value of Time. Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren*, 2016. URL: https://blog.iao.fraunhofer.de/images/blog/studie-value_of_time.pdf [Stand: 04.10.2017].

Gao et al. 2016

Gao et al.: *Automotive Revolution – Perspectives towards 2030*. McKinsey, Advanced Industries, Januar 2016. URL:

<http://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/high%20tech/our%20insights/disruptive%20trends%20that%20will%20transform%20the%20auto%20industry/auto%202030%20report%20jan%202016.ashx> [Stand: 04.10.2017].

Gibbs 2016

Gibbs, S.: „Mercedes-Benz swaps robots for people on its assembly lines“. In: *The Guardian* (Artikel vom 26. Februar 2016).

URL: <https://www.theguardian.com/technology/2016/feb/26/mercedes-benz-robots-people-assembly-lines> [Stand: 04.10.2017].

Greis 2015

Greis F.: „Auf dem Highway ist das Lenkrad los“. In: *golem* (Artikel vom 25. August 2015).

URL: <https://www.golem.de/news/autonomes-fahren-auf-dem-highway-ist-das-lenkrad-los-1508-115367.html> [Stand: 04.10.2017].

Greis 2017

Greis F.: „Die längste Fahrprüfung des Universums“. In *golem* (Artikel vom 3. November 2017)

URL: <https://www.golem.de/news/zulassung-autonomer-autos-die-laengste-fahrpruefung-des-universums-1611-124139.html> [Stand: 05.10.2017].

GSK 2017

GSK Stockmann 2017: *Neue Regelungen zum Automatisierten Fahren in Deutschland* (Update vom 4. Januar 2017). URL:

https://www.gsk.de/uploads/media/GSK_Update_Automatisiertes_Fahren.pdf [Stand: 04.10.2017].

GTAI 2016

Germany Trade & Invest: *Israel steigt massiv in autonomes Fahren ein*, Artikel vom 21. Juli 2016, URL: <https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/Maerkte/suche,t=israel-steigt-massiv-in-autonomes-fahren-ein,did=1496746.html> [Stand: 05.10.2017].

Hägele et al. 2011

Hägele, M. / Blümlein, N./ Kleine, O. : *Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung*, EFFIROB: Eine Analyse der Fraunhofer Institute IPA und ISI im Auftrag des BMBF, Stuttgart 2011.

Hagerty 2015

Hagerty, J. R.: “Meet the New Generation of Robots for Manufacturing”. In: *The Wall Street Journal* (Artikel vom 2. Juni 2015). URL: <https://www.wsj.com/articles/meet-the-new-generation-of-robots-for-manufacturing-1433300884> [Stand: 04.10.2017].

Harris 2017

Harris, M.: “California Gives the Green Light to Self-Driving Cars”. In: *IEEE Spectrum* (Artikel vom 10. März 2017). URL: <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/california-gives-the-green-light-to-selfdriving-cars> [Stand: 04.10.2017].

Hawkins 2016

Hawkins, A. J.: „Meet Uber’s first self-driving car“. In: *The Verge* (Artikel vom 19. Mai 2016). URL: <https://www.theverge.com/2016/5/19/11711890/uber-first-image-self-driving-car-pittsburgh-ford-fusion> [Stand: 04.10.2017].

Headquarters for Japan’s Economic Revitalization 2015

The Headquarters for Japan’s Economic Revitalization: *New Robot Strategy: Japan’s Robot Strategy – Vision, Strategy, Action Plan*”, 2015.

Hecking 2016

Hecking, M.: “Wie Google und Uber die USA zum Hotspot für autonomes Fahren machen wollen“. In: *manager magazin* (Artikel vom 28. April 2016). URL: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/uber-google-und-lyfts-lobby-allianz-fuer-autonome-autos-a-1089568.html> [Stand: 04.10.2017].

Herger 2017

Herger, M.: *Deutsche Ethikkommission und das autonome Fahren* (Artikel vom 29. Juni 2017). URL: <https://derletztefuhrerscheineuling.com/2017/06/29/deutsche-ethikkommission-und-das-autonome-fahren/> [Stand: 04.10.2017].

Hintze 2017

Hintze, F.: „BAE Systems: Das selbstfliegende Flugzeug“. In: *The Frequent Traveller*. URL: <http://www.tft-mag.com/up-in-the-air/bae-systems-das-selbstfliegende-flugzeug/> [Stand: 5.10.2017]

Huaxia 2016

Huaxia: “China rolls out 5-year plan for intelligent manufacturing”. In: *Xinhuanet* (Artikel vom 7. Dezember 2016). URL: http://news.xinhuanet.com/english/2016-12/07/c_135888299.htm [Stand: 05.10.2017].

IFR 2015

International Federation of Robotics, Statistical Department (Hrsg.): *World Robotics 2015 – Industrial Robots*, Frankfurt am Main 2015.

IFR 2016

International Federation of Robotics, Statistical Department (Hrsg.): *World Robotics – Industrial Robots 2016*, Executive Summary, Frankfurt am Main 2016.

Jordan/Mitchell 2015

Jordan, M./ Mitchell, T.: „Machine learning: Trends, perspectives, and prospects“. In: *Science*, 349: 6245, 2015, S. 255-260.

KIRIA 2016

Korea Institute for Robot Industry Advancement: *About KIRIA*. URL: <http://www.k-ro-bot.org/index.9is;jsessionid=3B3F15F02B7DF806605EA9E0A7C80920?contentUid=0000000047cda2f401485d66d993036f> [Stand: 04.10.2017].

KLRI 2017

Korea Legislation Research Institute: *Intelligent Robots Development and Distribution Promotion Act*, Act No. 9014, Mar. 28. 2008, Ammended by Act No. 9161, Dec. 19, 2008. URL: http://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=17399&type=part&key=18 [Stand: 05.10.2017].

KNX 2017

KNX Association, 2017. URL: <https://www.knx.org/knx-en/index.php> [Stand: 05.10.2017].

Kooperation International 2015

Kooperation International/ Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Faszination Innovation, Japan startet Robotik-Strategie* (Artikel vom 9. Juni 2015). URL: <http://www.kooperation-international.de/aktuelles/faszination-innovation/detail/info/japan-startet-robotik-strategie/> [Stand: 04.10.2017].

Lemmer 2016

Lemmer, K. (Hrsg.): *Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft* (acatech STUDIE). München: Herbert Utz Verlag 2016.

Maier 2016

Maier, F.: „So gehen die Auto-Hacker vor“. In: *Computerwoche* (Artikel vom 18. Juli 2016). URL: <https://www.computerwoche.de/a/so-gehen-die-auto-hacker-vor,3215159> [Stand: 04.10.2017].

Meissner/Wübbeke 2016

Meissner M./ Wübbeke J.: „Digitalisierung des Autos – Anfang vom Ende des China Booms für internationale Autobauer?“. In: *MERIC China Monitor*, Berlin 2016. URL: <https://www.merics.org/de/redirect/pdf-china-monitor-nummer-31/> [Stand: 04.10.2017].

Menge-Sonntag 2017

Menge-Sonntag, R.: „Künstliche Intelligenz: Google bringt eine Machine-Learning-Bibliothek für das Web“. In: *heise online* (Artikel vom 16. August 2017). URL: <https://www.heise.de/developer/meldung/Kuenstliche-Intelligenz-Google-bringt-eine-Machine-Learning-Bibliothek-fuer-das-Web-3803214.html> [Stand: 04.10.2017].

Neumann 2017

Neumann, P.: „Autonome Fahrzeuge: Berlin bekommt Roboter auf Rädern“. In: *Berliner Zeitung* (Artikel vom 30. Mai 2017). URL: <http://www.berliner-zeitung.de/berlin/berlin2025/autonome-fahrzeuge-berlin-bekommt-roboter-auf-raedern-26944554> [Stand: 04.10.2017].

Nikkei 2016

Nikkei Asian Review: Japan panel to promote self-driving cars in special zones. (Artikel vom 1. Dezember 2016). URL: <https://asia.nikkei.com/Japan-Update/Japan-panel-to-promote-self-driving-cars-in-special-zones> [Stand: 05.10.2017].

NSF 2017

National Science Foundation: *National Robotics Initiative 2.0: Ubiquitous Collaborative Robots* (NRI-2.0). URL: https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503641 [Stand: 04.10.2017].

Odrich 2017a

Odrich, P.: „Boeing will ab 2018 den Verkehrsflug ohne Pilot testen“. In: Ingenieur.de (Artikel vom 9. Juni 2017). URL: <http://www.ingenieur.de/Themen/Flugzeug/Boeing-ab-2018-Verkehrsflug-Pilot-testen> [Stand: 05.10.2017]

Odrich 2017b

Odrich, P.: „Boeing und Korean Air bauen autonome Kampfhubschrauber“. In: Ingenieur.de (Artikel vom 18. Oktober 2017). URL: <http://www.ingenieur.de/Themen/Flugzeug/Boeing-Korean-Air-bauen-autonome-Kampfhubschrauber> [Stand: 05.10.2017]

oneM2M 2017

oneM2M Partners: *Cross Sector Standards*, 2017. URL: <http://www.onem2m.org/> [Stand: 05.10.2017].

Pakalski 2017

Pakalski, I.: „Cortana steuert Smart-Home-Geräte“. In: *golem* (Artikel vom 8. Oktober 2017). URL: <https://www.golem.de/news/microsoft-cortana-steuert-smart-home-geraete-1710-130497.html> [Stand: 5.10.2017]

Plass-Fleßenkämper 2017

Plass-Fleßenkämper, B.: „Südkorea baut eine künstliche Stadt für autonome Autos“. In: *Wired.de* (Artikel vom 10. Mai 2017). URL: <https://www.wired.de/collection/tech/k-city-suedkorea-testgelaende-selbstfahrende-autonome-autos> [Stand: 04.10.2017].

Plattform Industrie 4.0 2016

Plattform Industrie 4.0: *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0), Eine Einführung*, 2016. URL: https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-eine-einfuehrung.pdf?__blob=publicationFile&v=7 [Stand: 05.10.2017].

Pluta 2017a

Pluta, W.: „Neues Verfahren beschleunigt Tests für autonome Autos“. In: *golem* (Artikel vom 29. Mai 2017). URL: <https://www.golem.de/news/autonomes-fahren-neues-verfahren-beschleunigt-tests-fuer-autonome-autos-1705-128073.html> [Stand: 04.10.2017].

Pluta 2017b

Pluta, W.: „US-Wissenschaftler narren autonom fahrende Autos“. In: *golem* (Artikel vom 7. August 2017). URL: <https://www.golem.de/news/maschinensehen-us-wissenschaftler-narren-autonom-fahrende-autos-1708-129349.html> [Stand: 04.10.2017].

Prakash 2016

Prakash, A.: “Israeli Security Expertise Supports Robotics Expansion”. In: *robotics business review* (Artikel vom 30. August 2016). URL: <https://www.roboticsbusinessreview.com/security/israeli-security-expertise-supports-robotics-expansion/> [Stand: 04.10.2017].

Reuters 2016

Reuters-Redaktion: “China plant Durchbruch beim autonomen Fahren für 2021”. In: *Reuters* (Artikel vom 26. Oktober 2016). URL: <http://de.reuters.com/article/china-autonomesfahren-idDEKCN12Q13M> [Stand: 05.10.2017].

Rietz 2017

Rietz, H.: „Autonome Fahrzeuge brauchen keine Ethik-Software“. In: *Neue Züricher Zeitung* (Artikel vom 30. August 2017). URL: <https://www.nzz.ch/meinung/autonome-fahrzeuge-brauchen-keine-ethik-software-ld.1308201> [Stand: 04.10.2017].

ROBOLAW.ASIA Initiative 2017

ROBOLAW.ASIA Initiative: *Welcome to ROBOLAW.ASIA Initiatives*, 2017. URL: <http://www.robolaw.asia/index.html> [Stand: 05.10.2017].

Rötzer 2017

Rötzer, F.: „Bilderkennungsprogramme von autonomen Fahrzeugen können ausgetrickst werden“. In: *heise online* (Artikel vom 7. Mai 2017). URL: <https://www.heise.de/tp/features/Bilderkennungsprogramme-von-autonomen-Fahrzeugen-koennen-ausgetrickst-werden-3695745.html> [Stand: 04.10.2017].

RT 2016

Russia Today: „*Israel refuses to sign US document regulating export of killer drones – report*“, Artikel vom 25. Oktober 2017, URL: <https://www.rt.com/news/363852-israel-refuses-us-drone-regulation/> [Stand: 05.10.2017].

Sokolov 2015

Sokolov, D.: „Die sieben Hürden zum selbstfahrenden Auto“. In: *heise online* (Artikel vom 28. Juli 2015). URL: <https://www.heise.de/ct/artikel/Die-sieben-Huerden-zum-selbstfahrenden-Auto-2764145.html> [Stand: 04.10.2017].

Sokolov 2017

Skolov, D. AJ.: „Abschied vom autonomen Auto“. In: *heise online* (Artikel vom 14. Juli 2017). URL: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Abschied-vom-autonomen-Auto-3771294.html> [Stand: 04.10.2017].

Stanford University 2017

Stanford University: *One Hundred Year Study on Artificial Intelligence (AI100)*, 2017. URL: <https://ai100.stanford.edu/about> [Stand: 05.10.2017].

Tesla 2017

Tesla 2017: *Hardware für autonomes Fahren in allen Fahrzeugen*, 2017. URL: https://www.tesla.com/de_DE/autopilot [Stand: 05.10.2017].

Thread 2017

The Thread Group, 2017. URL: <https://threadgroup.org/> [Stand: 05.10.2017].

Uber 2017

Uber: Self-Driving Ubers: *The world's first Self-Driving Ubers are on the road in the Steel City*, 2017. URL: <https://www.uber.com/cities/pittsburgh/self-driving-ubers/> [Stand: 05.10.2017].

Vellinga 2017

Vellinga, N.E.: "From the testing to the deployment of self-driving cars: Legal challenges to policymakers on the road ahead". In: *Computer Law & Security Review: The International Journal of Technology Law and Practice*, doi: 10.1016/j.clsr.2017.05.006.

Vogt 2016

Vogt, A.: „Autonomes Fahren: Bosch beginnt Tests in Japan.“ In: *Automobilwoche* (Artikel vom 29. Oktober 2015). URL: <https://www.automobilwoche.de/article/20151029/NACHRICHTEN/151029958/1337/autonomes-fahren-bosch-beginnt-tests-in-japan> [Stand: 04.10.2017].

W3C 2017

World Wide Web Consortium (W3C): *Industry Experts to Share Business Insights at W3C's First Executive Forum, 8 November in San Francisco*, 2017 (Artikel vom 26. September 2017). URL: <https://www.w3.org/> [Stand: 05.10.2017].

Weißmann und Deutsch 2016

Weißmann, A. und Deutsch, E.: „Kognitives Assistenzsystem unterstützt Ärzte und die Transformation des Gesundheitswesens“ (Blog vom 10. Juni 2016). URL: <https://www.ibm.com/de-de/blogs/think/2016/06/10/ibm-watson-gesundheitswesen/> [Stand: 05.10.2017]

Wahlster/ Kirchner 2015

Wahlster, Wolfgang/ Kirchner, Frank: *Autonome Systeme: Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen und Anwendungspotenziale*. Deutsches Zentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) 2015.

Weinrich 2016

Weinrich, R.: „Autonomes Fahren: Europäisches Regelwerk gefordert“. In: *eurotransport.de* (Artikel vom 21. April 2016). URL: <http://www.eurotransport.de/news/autonomes-fahren-europaeisches-regelwerk-gefordert-7420897.html> [Stand: 04.10.2017].

Wilkins 2017

Wilkins A.: „Rolls-Royce und Google forschen gemeinsam an autonomen Schiffen“. In: *heise online* (Artikel vom 6. Oktober 2017). URL: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Rolls-Royce-und-Google-forschen-gemeinsam-an-autonomen-Schiffen-3851143.html> [Stand: 5.10.2017]

Wübbeke 2015

Wübbeke, J.: „Die Kampfungsage an Deutschland“. In: *ZEIT ONLINE* (Artikel vom 27. Mai 2015). URL: <http://www.zeit.de/wirtschaft/2015-05/china-industrie-technologie-innovation> [Stand: 04.10.2017].

Wynn et al. 2014

Wynn et al. “Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience”. In: *Marine Geology*, 352, 2014, S. 451–468.

Yang 2017

Yang, B.Z.: “Who Will Satisfy China’s Thirst for Industrial Robots?” In: *The Diplomat* (Artikel vom 19. Mai 2017). URL: <http://thediplomat.com/2017/05/who-will-satisfy-chinas-thirst-for-industrial-robots/> [Stand: 04.10.2017].

Ziegler 2015

Ziegler, P-M.: “Agritechnica 2015: „Smart Farming und intelligente Traktoren“. In: *heise online* (Artikel vom 30. Oktober 2015). URL: <https://www.heise.de/ct/ausgabe/2015-24-Smart-Farming-und-intelligente-Traktoren-2856744.html> [Stand: 04.10.2017].

Zigbee Alliance 2017

Zigbee Alliance 2017. URL: <https://zigbee.org> [Stand: 05.10.2017].