

Roos, Michael; Siegmann, Marvin

**Working Paper**

## Technologie-Roadmap für das autonome Autofahren: Eine wettbewerbsorientierte Technik- und Marktstudie für Deutschland

Working Paper Forschungsförderung, No. 188

**Provided in Cooperation with:**

The Hans Böckler Foundation

*Suggested Citation:* Roos, Michael; Siegmann, Marvin (2020) : Technologie-Roadmap für das autonome Autofahren: Eine wettbewerbsorientierte Technik- und Marktstudie für Deutschland, Working Paper Forschungsförderung, No. 188, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/222428>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de/legalcode>

# WORKING PAPER FORSCHUNGSFÖRDERUNG

---

Nummer 188, Juli 2020

## Technologie-Roadmap für das autonome Autofahren

Eine wettbewerbsorientierte Technik- und  
Marktstudie für Deutschland

Michael Roos und Marvin Siegmann

---

© 2020 by Hans-Böckler-Stiftung  
Georg-Glock-Straße 18, 40474 Düsseldorf  
[www.boeckler.de](http://www.boeckler.de)



„Technologie-Roadmap für das autonome Autofahren“  
von Michael Roos und Marvin Siegmann ist lizenziert unter

**Creative Commons Attribution 4.0 (BY).**

Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. (Lizenztext: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de/legalcode>)

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. von Schaubildern, Abbildungen, Fotos und Textauszügen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

**ISSN 2509-2359**

# Inhalt

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Zusammenfassung.....                                               | 4   |
| 1. Überblick und Methodik .....                                    | 8   |
| 1.1 Stand der Forschung .....                                      | 8   |
| 1.2 Methodisches Vorgehen .....                                    | 9   |
| 2. Einführung in das Technologie-Roadmapping .....                 | 12  |
| 2.1 Definitionen und Ursprung .....                                | 13  |
| 2.2 Struktur und Aufbau .....                                      | 14  |
| 2.3 Methodik .....                                                 | 20  |
| 2.4 Forschungsüberblick.....                                       | 27  |
| 3. Die Technologien des autonomen Fahrens .....                    | 29  |
| 3.1 Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsysteme .....              | 29  |
| 3.2 Automatisiertes und autonomes Fahren.....                      | 30  |
| 3.3 Die Car2X-Kommunikation.....                                   | 43  |
| 3.4 Die zeitliche Realisierbarkeit des autonomen Fahrens.....      | 45  |
| 4. Wettbewerb um das autonome Autofahren.....                      | 51  |
| 4.1 Neue Formen der Automobilität .....                            | 52  |
| 4.2 Die Bedeutung der Autoindustrie .....                          | 58  |
| 4.3 Neuer Wettbewerb in der Autoindustrie.....                     | 60  |
| 5. Beispiel zweier Technologie-Roadmaps und ihrer Anwendung .....  | 68  |
| 5.1 Annahmen und Methode.....                                      | 68  |
| 5.2 Technologie-Roadmap.....                                       | 70  |
| 5.3 Anwendung der Roadmap .....                                    | 73  |
| 5.4 Zwei Szenarien .....                                           | 75  |
| 5.5 Schlussbemerkungen .....                                       | 80  |
| Anhang: Leitfaden und Zusammenfassung der Experteninterviews ..... | 81  |
| Literatur.....                                                     | 93  |
| Autoren .....                                                      | 112 |

## Zusammenfassung

Das autonome Autofahren wird als einer der Treiber für einen radikalen Umbruch in der Automobilbranche und im Verkehrssystem gesehen. Gemessen an der Zahl der Patente zählt Deutschland nach allgemeiner Ansicht dabei zu den Technologieführern. Mit den neuen Technologien wird sich aber nicht nur das Produkt Automobil ändern, sondern auch dessen Nutzung. Den deutschen Unternehmen muss es daher ebenso gelingen, die technisch hochentwickelten Produkte in neue, profitable Geschäftsmodelle zu überführen.

Es zeichnet sich ein Trend zur „Mobilität als Dienstleistung“ ab, bei dem Unternehmen zukünftig weniger durch Produktion und Verkauf der Fahrzeuge als durch das Anbieten von Fahrdiensten mit autonomen Fahrzeugen („Robo-Taxis“) Gewinne erzielen werden.

Die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft beruht in großem Ausmaß auf der Leistungsfähigkeit seines Ingenieurwesens. Jedoch gibt es eine Reihe von bekannten deutschen Erfindungen (Walkman, MP3-Format, Telefax, Hybridantrieb), von denen andere Volkswirtschaften deutlich stärker profitiert haben, weil die deutschen Erfinder eher produkt- und zu wenig marktorientiert waren. Disruptionen in der Automobil- und der Verkehrswirtschaft hätten erhebliche Auswirkungen auf die Beschäftigung in Deutschland.

Die vorliegende Studie stellt die Methode des Technologie-Roadmapping vor und wendet sie auf das autonome Autofahren an. Das Technologie-Roadmapping ermöglicht die Vorausschau von Technologien und ihren Marktchancen im Zeitverlauf (vgl. Möhrle/Isenmann 2017). Das Resultat sind Technologie-Roadmaps als Instrument zur langfristigen, strategischen Steuerung von Unternehmen. Wir stellen beispielhaft zwei Technologie-Roadmaps vor und erläutern, wie diese als Hilfsmittel für strategische Entscheidungen in der deutschen Automobilindustrie verwendet werden könnten. Die Ergebnisse der Studie können Unternehmen – auch unter Beteiligung der Arbeitnehmervertretungen – helfen, Strategien für den bevorstehenden Strukturwandel zu erarbeiten.

Sowohl zur Erstellung der Technologie-Roadmaps als auch zur Bewertung des aktuellen Standes der Technologien beim autonomen Fahren wurden Experteninterviews geführt. Die darin gewonnenen Erkenntnisse ergänzten die Einsichten aus der Literatur und halfen uns, diese zu beurteilen. Diese Studie ist die Erste, die Erkenntnisse aus der Forschungsliteratur und Experteninterviews zum autonomen Autofahren in Deutschland in der Form von Technologie-Roadmaps zusammenführt.

Im ersten Kapitel wird der *Forschungsstand* zum autonomen Fahren zusammengefasst und das *methodische Vorgehen* dieser Studie erläutert. Kapitel 2 bietet eine *Einführung in das Technologie-Roadmapping*. Das Technologie-Roadmapping ist ein Instrument der technologischen Zukunftsschau und der strategischen Planung in Form grafischer Repräsentationen von Technologien und deren Abhängigkeiten im Zeitverlauf. Technologie-Roadmaps sind konsensbasierte und wissenschaftliche fundierte Darstellungen attraktiver Zukunftsszenarien.

Anhand einer Technologie-Roadmap kann ein Unternehmen wichtige, strategische Fragen visualisieren und damit eine Grundlage für Entwicklungs- und Veränderungsprozesse legen:

1. Wo wollen wir hin? → erstrebenswertes Zukunftsszenario
2. Wo stehen wir aktuell? → technologische Ausgangsposition
3. Wie können wir zum Ziel gelangen? → erforderliche Schritte der Technologie-, Produkt- und Marktentwicklung zur Zielerreichung

Eine Technologie-Roadmap ist das Ergebnis eines Roadmapping-Prozesses, der mindestens so wichtig wie die Roadmap selbst ist. Im Roadmapping-Prozess können sich die Beteiligten über wichtige, strategische Themen verständigen und ein gemeinsames Verständnis der Herausforderungen entwickeln. Die Einbeziehung von Experten verschiedener Disziplinen und der relevanten Entscheidungsträger sowie deren Bereitschaft, sich auf den Prozess einzulassen, ist von zentraler Bedeutung für den Erfolg der Methode.

Kapitel 3 bietet einen Überblick über die *Technologien des autonomen Fahrens*. Bei der Definition automatisierter und autonomer Fahrzeuge folgen wir der weit verbreiteten Klassifizierung der *Society of Automotive Engineers* (SAE) von Level 0 (keine Automatisierung), über Level 1 (Fahrassistenz), Level 2 (Teilautomatisierung) und Level 3 (Bedingte Automatisierung), hin zu Level 4 (Hochautomatisierung) und Level 5 (Vollautomatisierung).

Gegenwärtig existieren Level 1 und viele Aspekte von Level 2, bei dem der menschliche Fahrer das Fahrumfeld weiterhin überwacht, aber durch technische Systeme bei den operativen Fahraufgaben wie Lenken und Bremsen unterstützt wird. Das autonome Fahren, bei dem im Normalfall kein Eingreifen eines menschlichen Fahrers mehr erforderlich ist, bzw. auf den menschlichen Fahrer ganz verzichtet werden kann, beginnt bei Level 4.

Für das autonome Fahren werden grob folgende Technologien benötigt:

- Ortung und Navigation, z. B. GPS
- Sensorik: Video, LiDAR, Infrarot, Radar, Ultraschall, Odometrie

- CPU und Software zur Verarbeitung der Sensordaten und zur Entscheidungsfindung
- Kommunikation über Internet und Car2X-Verbindungen

Während praktisch alle Marktakteure auf die LiDAR-Technik setzen, vertraut Tesla stattdessen in hohem Maße auf eine künstliche Intelligenz zur Rekonstruktion dreidimensionaler Umgebungsbilder, wodurch ein Sonderweg beschritten wird.

Besonders hohe Entwicklungsbedarfe bestehen bei der Sensorik, der Softwareentwicklung und der Systemintegration. Während Tesla das voll-autonome Fahren bereits 2020 im realen Mischverkehr realisieren will, gehen die von uns befragten Experten und auch die meisten Autoren in der Literatur davon aus, dass folgende Realisierbarkeiten plausibler sind:

- SAE-Level 3: ab Mitte der 2020er Jahre
- SAE-Level 4: ab 2045
- SAE-Level 5: ab 2050

Wir stellen beide Einschätzungen in zwei verschiedenen Roadmaps dar.

Kapitel 4 beleuchtet die Marktseite und den *Wettbewerb um das autonome Autofahren*. Der Automobilbranche stehen abgesehen vom autonomen Fahren noch weitere erhebliche Strukturveränderungen durch die Elektrifizierung, die Konnektivität und die Verknüpfung unterschiedlicher Verkehrsträger und Mobilitätsformen (diverse Mobilität) bevor. Insbesondere durch das autonome Fahren könnte es zu einer starken Reduktion des privaten Automobilbesitzes zugunsten der geteilten Nutzung von Fahrzeugen („Mobility as a Service“) kommen. Dadurch wird das herkömmliche Geschäftsmodell des privaten Automobilkaufs und -leasings der etablierten Hersteller in Frage gestellt.

Durch neue Geschäftsmodelle und Wettbewerber verändert sich das Marktumfeld fundamental. Während die deutschen Automobilhersteller und -zulieferer hinsichtlich der Innovationskraft im Bereich der Fahrtechnologien eine gute Ausgangslage haben, hat der neue Konkurrent Tesla eine starke Position bei IT-Hardware und Software.

Die Technologieunternehmen Google, Amazon, Apple und Facebook forschen ebenfalls zum autonomen Autofahren und möchten in diesen Markt eintreten. Deren Geschäftsmodell dürfte, ebenso wie bei den Interessenten Microsoft und Netflix, vor allem in der Verbindung von Mobilitätsdienstleistungen mit Werbung, Unterhaltungsdienstleistungen und anderen datenbasierten Angeboten liegen. Wichtige Stärken dieser neuen Konkurrenten sind neben ihrer Kompetenz in der Datenverarbeitung ihre enorme Finanzstärke und der hohe Anteil an Ausgaben für Forschung und Entwicklung.

Kapitel 5 stellt zwei *Beispiele für Technologie-Roadmaps und ihre Anwendungen* auf das autonome Autofahren vor. Unsere Basis-Roadmap beschreibt ein evolutorisches Szenario aus der Perspektive eines deutschen Automobilherstellers, der das strategische Ziel hat, ab Mitte der 2040er Jahre Gewinne nicht mehr hauptsächlich durch den Verkauf von Automobilen an private Käufer zu erzielen, sondern vor allem durch während der Fahrt genutzte Zusatzdienste wie Büroanwendungen, Unterhaltungsangebote, Shopping oder Werbung.

In diesem Szenario gehen wir davon aus, dass Automobile ab Mitte der 2020er Jahre bis Anfang der 2040er Jahre bedingt automatisiert fahren (SAE-Level 3), so dass der menschliche Fahrer während der Fahrt immer noch eingreifen können muss. Erst ab den 2040er Jahren wäre hochautomatisiertes Fahren ab SAE-Level 4 möglich, bei dem sich der Fahrer während der Fahrt auch anderen Aktivitäten widmen kann.

Daneben betrachten wir ein alternatives Szenario, das in einer zweiten Roadmap dargestellt wird. Dieses Alternativszenario geht von einer für die deutschen Hersteller disruptiveren Entwicklung aus, bei der die Technologieunternehmen die Entwicklung zum autonomen Fahren in einer Weise vorantreiben, die das SAE-Level 3 praktisch überspringt und SAE-Level 4 sehr schnell in den kommenden Jahren erreicht. Dadurch müssten auch die Geschäftsmodelle deutlich eher als bisher angenommen angepasst werden, weil der Besitz privater Automobile schon bald durch die Nutzung von Mobilitätsdienstleistungen, die mit autonom fahrenden Fahrzeugen angeboten werden, abgelöst würde.

Für beide Szenarien stellen wir in den Roadmaps auch die Impulse aus Politik und Gesellschaft dar, die eine wichtige Rolle spielen werden.



# 1. Überblick und Methodik

In diesem Übersichtskapitel fassen wir den relevanten Forschungsstand zusammen und beschreiben das methodische Vorgehen bei der Erstellung dieser Studie.

## 1.1 Stand der Forschung

Die Technologien des autonomen Autofahrens entwickeln sich mit einem hohen Tempo. Es gibt bereits eine Reihe von Studien (z. B. Gandia et al. 2018, Will et al. 2017, Dumitrescu et al. 2018), die den technologischen Reifegrad des autonomen Fahrens in Deutschland und anderen Ländern untersuchen. Darin wird Deutschland neben den USA, China, Japan und Südkorea zur globalen Spitzengruppe gezählt. Allerdings beruhen diese Studien oft auf einer Auswertung von Patentdatenbanken, in denen nach dem Stichwort „autonomes Fahren“ und Synonymen gesucht wird. Solche Analysen fokussieren sehr auf die Technologien und nur wenig auf das marktfähige Produkt.

Auf der anderen Seite gibt es eine Reihe von Studien, die das zukünftige Mobilitätsverhalten untersuchen (z. B. Hasse et al. 2017, Stricker/Kalmbach/Zayer 2018, Heß/Polst 2017) und stärker auf Veränderungen des Nutzerverhaltens und der Marktstrukturen gerichtet sind. Darin werden Trends weg vom Besitz eines Autos hin zur Nutzung von Mobilitätsdienstleistungen („Mobility as a Service“) skizziert. Andere Studien betrachten wiederum die Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen und Car-sharing bei den potentiellen Nutzern (z. B. Haboucha/Ishaq/Shifan et al. 2017, Krueger/Rashidi/Rose 2016).

Wenn es tatsächlich einen Trend zur „Mobilität als Dienstleistung“ gibt, wird nicht das Fahrzeug allein über den Geschäftserfolg der Unternehmen entscheiden. Das Betreiben sogenannter Robo-Taxi-Flotten, die zuverlässig und effizient autonome Fahrdienstleistungen ermöglichen würden, erfordert z. B. Kompetenzen in den Bereichen Verkehrstelematik, Verkehrsplanung und Verkehrsprognose. Hars (2014) und Chen et al. (2016) untersuchen die Voraussetzungen, die Flotten von selbstfahrenden Taxis erfüllen müssen, um die Bedürfnisse der Nutzer erfüllen zu können. Es ist wahrscheinlich, dass traditionelle Automobilhersteller noch nicht in allen relevanten Technologiefeldern über ausreichende Kompetenzen verfügen.

Ebenso müssen die Unternehmen ihre Geschäftsmodelle umstellen. Müller et al. (2016) haben eine Machbarkeitsstudie zu Geschäftsmodellen

in der digitalen Wirtschaft vorgelegt, in der sie zeigen, dass es einen erheblichen Bedarf an der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle gibt, wie der aktuelle Forschungsstand zu diesem Thema ist und wo es weiteren Forschungsbedarf gibt. Andere Studien versuchen zu antizipieren, wie die Entwicklung des autonomen Fahrens zukünftig verlaufen könnte (z. B. Sessa et al. 2015, Bansal/Kockelmann 2017).

Was es jedoch bisher kaum gibt, sind Studien, die sowohl die technischen als auch die marktrelevanten Aspekte gemeinsam abdecken. Eine Ausnahme stellen Pakusch et al. (2016) dar, deren Arbeit aber einen eher allgemeinen Rahmen entwickelt und sich nicht mit der Frage beschäftigt, wie die deutsche Automobilindustrie positioniert ist.

Die vorliegende Studie befasst sich sowohl mit den Technologien des autonomen Fahrens als auch mit der gegenwärtigen und zukünftigen Markt- und Wettbewerbssituation, wodurch eine wichtige Forschungslücke geschlossen werden soll. Das Instrument des Technologie-Roadmapping ist ideal, um Forschungsergebnisse aus den Bereichen Technologie und Markt zusammenzuführen und zu veranschaulichen.

## 1.2 Methodisches Vorgehen

Bei der Erstellung der Studie sind wir methodisch wie folgt vorgegangen: Zunächst wurde eine umfangreiche *Literaturrecherche* zu den Themen „Technologie-Roadmapping“ und „autonomes Autofahren“ durchgeführt. Dabei wurden sowohl wissenschaftliche als auch praxisrelevante Quellen verwendet.

Da das Thema „autonomes Autofahren“ hochaktuell ist und viele Unternehmen daran arbeiten, würde die alleinige Auswertung von Forschungsliteratur nicht den aktuellen Entwicklungsstand angemessen widerspiegeln. Wo es sinnvoll war, haben wir deshalb auch auf aktuelle Veröffentlichungen von Unternehmen und Marktbeobachtern – z. B. Verbände und Unternehmensberatungen – zurückgegriffen. Das betrifft insbesondere die aktuellen Marktentwicklungen.

Ergänzend zur Auswertung der Literatur haben wir eine Reihe von *semi-strukturierten Interviews* mit Experten der Themen neue Mobilität und autonomes Fahren durchgeführt. Diese hatten den Zweck, die eigene Wahrnehmung und Interpretation der Literatur einer kritischen Diskussion auszusetzen. Die Interviewergebnisse werden in dieser Studie anonymisiert vorgestellt. Es standen Personen aus den folgenden Institutionen und Bereichen zu Verfügung:

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrsforschung, Berlin, aus dem Bereich Modellierung urbaner Mobilität

- Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruhe, aus den Bereichen Innovationsprozesse und Technikfolgen (zwei Experten)
- Verband der Automobilindustrie (VDA e. V.), Berlin, aus den Bereichen vernetzte und kooperative Fahrzeugsysteme sowie automatisiertes Fahren.
- Z\_punkt GmbH (Beratungsunternehmen), Köln, aus den Bereichen Mobilität und Logistik
- Agora Verkehrswende (Think Tank), Berlin, aus dem Bereich neue Mobilität
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, aus den Bereichen Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig, aus dem Bereich Vernetzung und Automation von Fahrzeugen
- Technische Universität Kaiserslautern, Institut für Mobilität und Verkehr (imove), Kaiserslautern, aus den Bereichen neue Mobilitätsdienstleistungen und automatisiertes Fahren

Insgesamt wurden neun Experten in zumeist persönlichen und seltener telefonischen Gesprächen befragt. Da die Experteninterviews nicht im Mittelpunkt der Untersuchung standen, sondern eine ergänzende Funktion hatten, werden sie hier nicht ausführlich vorgestellt. Wir verweisen im Text auf die anonymisierten Ergebnisse zur Bestätigung oder Einordnung eigener Einschätzungen aus der Literaturarbeit. Im Anhang wird ein kurzer Überblick über zentrale Erkenntnisse aus den Interviews gegeben.

Ein weiterer wichtiger Austausch fand mit einem weltweit führenden Experten für das Technologie-Roadmapping vom Department of Engineering der University of Cambridge statt, der mehrfach für Treffen und persönliche Gespräche zur Verfügung stand.

Aufbauend auf der Literaturrecherche und den Expertenbefragungen haben wir zwei beispielhafte *Technologie-Roadmaps* erstellt. Die normalerweise übliche gemeinsame Entwicklung von Roadmaps mit Experten und Stakeholdern war im Rahmen dieser Studie aufgrund des begrenzten Zeitbudgets nicht realisierbar.

Die vorgestellten Roadmaps erfassen deshalb nicht die spezifischen Bedingungen eines bestimmten Unternehmens und können auch nur begrenzt von dessen Entscheidungsträgern genutzt werden. Für eine konkrete Anwendung müsste auf unternehmensspezifische Informationen zurückgegriffen werden, die nur den jeweiligen Verantwortlichen zur Verfügung stehen.

Andererseits kann so nicht nur eine unternehmensspezifische, sondern sehr breite Übersicht über das Thema vermittelt werden, die den Akteuren ein Werkzeug der strategischen Planung im eigenen Entscheidungskontext sein soll. Die hier präsentierten Roadmaps dienen als Anschauungsbeispiel, wie die Methode ein- und umgesetzt werden könnte.

## 2. Einführung in das Technologie-Roadmapping

Das Technologie-Roadmapping hat sich zu einem wertvollen Instrument der technologischen Zukunftsschau und der strategischen Planung entwickelt. In Zeiten immer schnelleren technischen Fortschritts, kürzerer Innovationszyklen und stetigen sozialen Wandels verlieren traditionelle Vorhersagemethoden an Aussagekraft.

Dennoch haben Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Regierungen ein anhaltendes Interesse daran, die Wechselwirkungen zwischen technologischen Entwicklungen und deren sozio-ökonomischen Umfeldfaktoren adäquat beschreiben zu können. Genau hierin liegt die besondere Herausforderung der technologischen Zukunftsforschung, der sich das Technologie-Roadmapping – eines ihrer vielseitigsten Instrumente – erfolgreich annimmt.

Die Methode ermöglicht die fundierte Beschreibung von Entwicklungspfaden über längere Zeithorizonte und liefert einen entscheidenden Vorteil: Wer die Chancen und Hürden neuer Technologien schon heute erkennt, hat nicht nur eine bessere Vorstellung von der Zukunft, sondern kann sie auch mitgestalten. Beim Technologie-Roadmapping wird das dafür nötige Zusammenspiel technologischer, wirtschaftlicher und weiterer Faktoren strukturiert abgebildet (Möhrle/Isenmann 2017, VI). Die besondere Stärke der Methode liegt in der Veranschaulichung komplexer Zusammenhänge.

Das erste Kapitel dieser Studie liefert eine detaillierte und neuartige Einführung in das Technologie-Roadmapping. Zunächst werden unterschiedliche Definitionen vorgestellt und die Ursprünge der Methode reflektiert. Anschließend werden Struktur und Aufbau gängiger Technologie-Roadmaps erklärt und ein generalisiertes Rahmenkonzept präsentiert. Im Zuge einer methodischen Betrachtung werden auch quantitative und qualitative Forschungsansätze, Phasen der Erstellung sowie geeignete Qualitätskriterien besprochen. Vor- und Nachteile gegenüber anderen Formen der Zukunftsschau werden dabei ebenso diskutiert. Abschließend werden erfolgreiche Praxisbeispiele und der aktuelle Forschungsstand zusammengefasst.

In der deutschsprachigen Literatur wird das Technologie-Roadmapping zwar bereits beschrieben (vgl. Groß 2011; Möhrle/Isenmann 2017), in dieser Arbeit wird im Besonderen aber auch die dahinterliegende Intuition schrittweise erklärt und damit eine wichtige Forschungslücke geschlossen.

## 2.1 Definitionen und Ursprung

Technologie-Roadmaps werden unterschiedlich definiert: Nach Möhrle und Isenmann (2017, S. 3–4) zeigen sie grafische Repräsentationen von Technologien und deren Abhängigkeiten im Zeitverlauf; Jin et al. (2015, S. 127) beschreiben sie als Methode der mittel- bis langfristigen Planung von Technologie- und Produktentwicklungen, die auf zukünftige Marktbedürfnisse ausgerichtet sind; und Branscomb (1993) definiert sie als konsensbasierte und wissenschaftlich fundierte Darstellung attraktiver Zukunftsszenarien. Alle Tätigkeiten, die in der Erstellung einer solchen Übersicht münden, werden zusammengefasst als Technologie-Roadmapping bezeichnet (Kostoff/Schaller 2001).

Technologie-Roadmaps

- zeigen grafische Repräsentationen von Technologien und deren Abhängigkeiten im Zeitverlauf (vgl. Möhrle/Isenmann 2017, S. 3–4);
- dienen der mittel- bis langfristigen Planung von Technologie- und Produktentwicklungen, die auf zukünftige Marktbedürfnisse ausgerichtet sind (vgl. Jin/Jeong/Yoon 2015, S. 127);
- zeigen konsensbasierte und wissenschaftlich fundierte Darstellungen attraktiver Zukunftsszenarien (vgl. Branscomb 1993).

Die Wortzusammensetzung „Technologie-Roadmap“ ist ein in Wissenschaft und Praxis anerkannter Begriff, der an die Metapher einer Straßenkarte anknüpft. Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Regierungen sind analog zu Verkehrsteilnehmern auf geeignete Planungsmittel angewiesen, um Technologieentwicklungen verstehen und lenken zu können. Technologie-Roadmaps zeigen auf, welche Einzeltechnologien, Produkte oder Umfeldfaktoren dafür entscheidend sind, wie Teilkomponenten zueinanderstehen und wie sich Leistungs- und Verbreitungskennzahlen im Zeitverlauf entwickeln. Auf diese Weise können bestimmte Entwicklungspfade gezielt gefördert und mögliche Probleme frühzeitig erkannt werden (Jin/Jeong/Yoon 2015, S. 127).

Da Technologie-Roadmaps oft kollaborativ in Teams erstellt werden, wird häufig auch die Zusammenarbeit der beteiligten Akteure gestärkt (vgl. Caetano/Amaral 2011; Petrick/Echols 2004; Barker/Smith 1995), wovon die technische Entwicklung, aber auch die inhaltliche Abstimmung und Harmonisierung in der strategischen Planung profitieren. Immer wieder treten auch positive soziale und psychologische Effekte auf, etwa in Form einer verbesserten Kommunikation oder gesteigerter Zufriedenheit unter den Mitwirkenden (Möhrle/Isenmann 2017, S. 4–5). Grossman

(2004) argumentiert, dass der erhöhte, fachübergreifende Meinungsaustausch sogar einen größeren Nutzen als die fertige Technologie-Roadmap als solche stiftet.

Das Technologie-Roadmapping wurde erstmals von Bob Galvin, dem ehemaligen Geschäftsführer des Telekommunikationsunternehmens Motorola<sup>1</sup>, in den 1990er Jahren öffentlich vorgestellt<sup>2</sup>. Groenveld (1997), Bray und Garcia (1997) sowie die *European Industrial Research Management Association* (1997) lieferten die ersten wissenschaftlichen Beiträge, deren Anzahl aber erst ab 2004 bedeutend zunahm (vgl. Carvalho/Fleury/Lopes 2013, S. 1421).

Im Laufe der Zeit sind auch einige Unterformen des Roadmapping entstanden, die neben der Produkt- (Groenveld 2007), Strategie- und Langfrist- (Zhang et al. 2014), auch die Programm-, Prozess- und Integrationsplanung (NASA 2015) sowie das Wissensmanagement (Macintosh/Filby/Tate 1998) unterstützen. (Jin/Jeong/Yoon 2015, S. 127) Darüber hinaus gibt es zahlreiche Konzepte, deren Bezeichnungen an den Begriff der Technologie anschließen, darunter die Technologievorausschau, -frühaufklärung, -prognose, -wirkungsanalyse und -folgenabschätzung und das Technologiemonitoring (Zwierlein/Isenmann 1994; Möhrle/Isenmann 2017).

Die in dieser Studie angewandte Methode wird für gewöhnlich als Technologie-Roadmapping bezeichnet, manche Autoren bevorzugen auch den neutralen Begriff des Roadmapping, also ohne den Vorsatz der Technologie (vgl. Sprech/Behrens/Richter 2017; Geschka/Schäufele/Zimmer 2017; Schäperkötter/Deppe 2017). Um Verwechslungen mit begriffsähnlichen Methoden zu vermeiden, ist eine der Analyse vorangestellte Abgrenzung hilfreich.

## 2.2 Struktur und Aufbau

Technologie-Roadmaps werden in zahlreichen Formen präsentiert: Balkendiagramme (Willyard/McClees 1987), Graphen (EIRMA 1997), Illustrationen (Kelly et al. 1995; Yasunaga/Watanabe/Korenaga 2009), Tabellen (EIRMA 1997), Flussdiagramme (Yasunaga/Watanabe/Korenaga 2009) und Einzelebenen (Willyard/McClees 1987); am häufigsten werden jedoch Mehrebenenmodelle genutzt, die auf eine Beschreibung der schon zuvor erwähnten *European Industrial Research Management Association*

---

1 Motorola wurde 2011 in die *Motorola Solutions* und *Motorola Mobility* aufgeteilt.

2 Indizien sprechen dafür, dass die Methode auch schon zuvor in der Unternehmenspraxis angewandt wurde.

(EIRMA 1997) zurückgehen. Auch die Technologie-Roadmap zum autonomen Autofahren, die in dieser Studie entsteht, folgt diesem Beispiel<sup>3</sup>.

Das Grundgerüst des Mehrebenenmodells besteht aus drei übergeordneten Ebenen, anhand derer die Technologien, Produkte und Marktfelder einer Technologieentwicklung geordnet werden. Die untenstehende Abbildung 1 skizziert diesen Aufbau schematisch: In der Vertikalen sind von unten beginnend eine *Technologie*-, darüber eine *Produkt*- und ganz oben eine *Marktebene* abgebildet. In der Horizontalen ist ein Zeitstrahl aufgespannt, dessen linkes Ende den ältesten Zeitpunkt – etwa den Beginn einer Technologieentwicklung – und rechtes Ende den am weitesten in der Zukunft liegenden Zwischen- oder Endstand markiert<sup>4</sup>.

Nach diesem Raster werden die Bestandteile einer Technologieentwicklung im Schaubild platziert und zu Knotenpunkten zusammengefügt, die hier durch Rechtecke symbolisiert werden; in der Literatur sind aber auch andere Notationen verbreitet (vgl. EIRMA 1997; Möhrle/Isenmann 2017). Die Knotenpunkte repräsentieren auf der Technologieebene einzelne Technologien oder zusammenhängende Teiltechnologien. Analog dazu werden durch Knotenpunkte auf der Produktebene einzelne Produkte oder Produktgruppen und durch solche auf der Marktebene verschiedene Geschäftsfelder zusammengefasst (Jin/Jeong/Yoon 2015, S. 128).

Die Bestandteile einer Technologieentwicklung bauen aufeinander auf oder lösen einander ab. So werden für die Entwicklung einer bestimmten Technologie verschiedene Teilkomponenten benötigt, Produkte werden aus verschiedenen Technologien zusammengesetzt, und es bedarf verschiedener Produkte, um ein Marktfeld zu bedienen. Beim Technologie-Roadmapping können solche Abhängigkeiten durch verbindende Striche zwischen den Knotenpunkten angezeigt werden; daran angehängte Pfeile geben Aufschluss über die Richtung möglicher Pfadabhängigkeiten (siehe Abbildung 1).

Demnach werden durch Verknüpfungen innerhalb einer Ebene technologie-, produkt- oder marktspezifische Beziehungen betont, Verbindungen zwischen der Technologie- und der Produktebene machen wiederum deutlich, welche Technologien für ein bestimmtes Produkt erforderlich sind. Gleichermäßen werden durch Verknüpfungen zwischen der Produkt- und der Marktebene die Geschäftsfelder für bestimmte Produkte de-

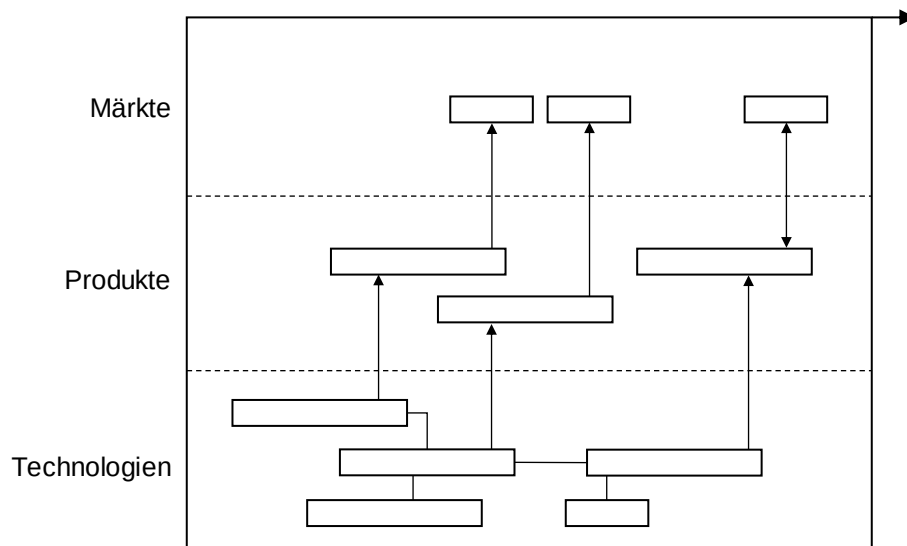
3 Dass die zuvor beschriebene Analogie einer Straßenkarte wie geschaffen für ein automobiles Thema scheint, ist nur ein passender Zufall.

4 Manchmal wird auch ein nicht-linearer Zeithorizont gesetzt, etwa mit längeren Zeitabständen in der kurzen Sicht, um einen Fokus auf die aktuellen Handlungsbedarfe oder die Budgetierung zu legen (Phaal 2019). Die langfristige Vision wird dann nur angedeutet.



finiert (Jin/Jeong/Yoon 2015, S. 128–129). Viele solcher Abhängigkeiten – oder auch Potenziale – werden erst durch das Technologie-Roadmapping offengelegt und blieben ohne vergleichbare Analyse womöglich unerkannt.

Abbildung 1: Aufbau von Technologie-Roadmaps im Mehrebenenmodell

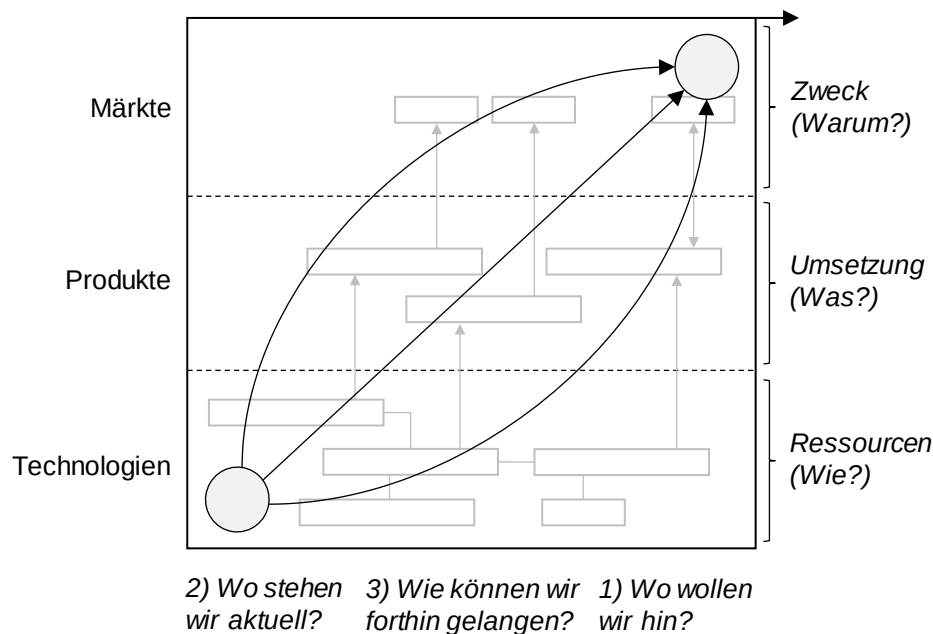


Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an EIRMA (1997) und Probert et al. (2003)

Der in Abbildung 1 gezeigte Aufbau beschreibt mögliche Entwicklungspfade durch die Ebenen entlang der Zeitachse. In der Vertikalen bildet die Technologieebene die *Ressourcen* ab, beschreibt also das „Wie“ einer Technologieentwicklung, die Produktebene die *Umsetzung*, das „Was“, und die Marktebene den *Zweck*, also das „Warum“. Zusätzlich konkretisiert die Zeitachse „wann“ bestimmte Schlüsseltechnologien und -produkte verfügbar sein müssen, um eine Technologieentwicklung fortschreiben zu können (vgl. Garcia/Bray 1997).

In der Horizontalen sind drei weitere, strategische Fragen impliziert: 1. „Wo wollen wir hin?“, gemeint ist das erstrebenswerte Zukunftsszenario, das sich aus grafischer Sicht zumeist oben rechts befindet; 2. „Wo stehen wir aktuell?“, eine Frage, die den gegenwärtigen Zustand rekapituliert (meistens unten links liegend); und 3. „Wie können wir dorthin gelangen?“, mit anderen Worten, wie das in Frage 1 definierte Zukunftsszenario erreicht werden könnte (vgl. Phaal 2019). Aus grafischer Sicht werden also mögliche Entwicklungspfade zwischen den Punkten unten links und oben rechts skizziert (siehe Abbildung 2).

### Abbildung 2: Die Erzählweise von Technologie-Roadmaps



Quelle: eigene Abbildung

Abbildung 2 verdeutlicht, dass es beim Technologie-Roadmapping insbesondere um die Entwicklung und Vermittlung von Narrativen geht, die eine wichtige Rolle für die Umsetzung von Entwicklungs- und Veränderungsprozessen spielen. Den Beteiligten muss vor Augen geführt werden, was das Ziel einer Veränderung ist und wie man dieses vom gegenwärtigen Standort aus erreichen kann. Ohne ein solches Narrativ ist es schwer, die Beteiligten zu den für die Veränderung erforderlichen Handlungen zu motivieren.

Das gezeigte Schema sollte aber nicht als feste Strukturvorgabe verstanden werden. Technologie-Roadmaps sind vielmehr dynamisch (vgl. Phaal/Muller 2009) und flexibel anpassbar (vgl. Phaal/Farrukh/Probert 2004a; Lee/Park 2005). So kann es hilfreich sein, weitere Unterebenen zu definieren. Nach Probert et al. (2003) umfasst die Technologieebene auch *Kompetenzen* und *Ressourcen*, die Produktebene auch *Dienstleistungen*, *Fähigkeiten* sowie *Verfahrenstechniken* und die Marktebene auch einzelne *Geschäftsfelder*. Manchmal wird das Schema auch um eine Ebene für den Bereich *Forschung und Entwicklung* an unterster Stelle ergänzt (vgl. Möhrle/Isenmann 2017, S. 7).

Im Sinne einer möglichst ganzheitlichen Betrachtung können auch externe Faktoren wie Markttrends oder politische und rechtliche Rahmenbedingungen ergänzt werden. Ebenso kann auch die Zeitachse in mehrere

Abschnitte unterteilt werden, etwa in kurz-, mittel-, und langfristige Horizonte oder ferne Zukunftsvisionen. Sofern möglich, ist auch der Blick in die Vergangenheit hilfreich, schließlich vermittelt die Historie wertvolle Anhaltspunkte für den weiteren Verlauf einer Technologieentwicklung, auch deshalb, weil einige Branchen wiederkehrende Entwicklungszyklen durchleben<sup>5</sup>. Dieses Prinzip wurde erstmal von Mills et al. (1994) auf die Beschreibung einer Produktionsstrategie angewandt. Später begründeten Phaal et al. (2011) das Konzept von „Emergence Maps“, die das Technologie-Roadmapping um die Retrospektive erweitern.

In Abbildung 3 ist ein generalisiertes Rahmenkonzept abgebildet, das die genannten Erweiterungen aufgreift. Darin beschreibt die vertikale Achse die funktionale Perspektive auf eine Technologieentwicklung, an die sich fachspezifische Betrachtungsweisen anschließen (linke Seite). Aus der zuvor erwähnten Unterscheidung nach den Ressourcen, der Umsetzung und dem Zweck werden unterschiedliche Informationstypen abgeleitet (rechte Seite), die verdeutlichen, wo die treibenden Faktoren einer Technologieentwicklung liegen: Marktbedürfnisse, politische Rahmenbedingungen oder gesellschaftliche und strukturelle Veränderungen wirken als Innovationsauslöser von oben nach unten (*Market-Pull*, allgemeiner auch *Nachfrage-Pull*); neue technische Errungenschaften begründen die Suche nach geeigneten Geschäftsmodellen von unten heraus (*Technology-Push*, allgemeiner auch *Angebots-Push*).

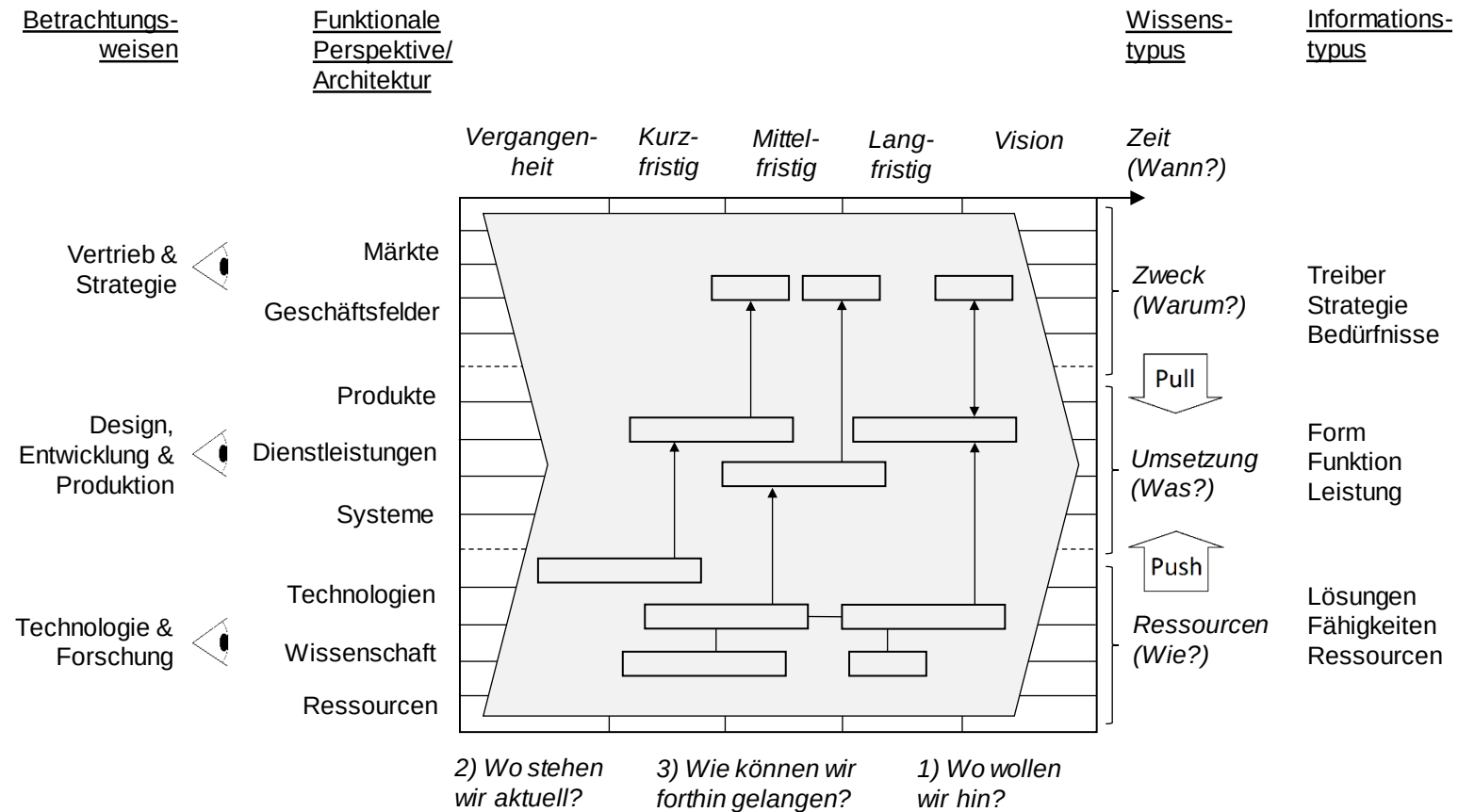
Technologie-Roadmaps unterscheiden sich auch dadurch, dass einzelne Knotenpunkte, Entwicklungspfade oder Meilensteine farblich akzentuiert oder durch die Wahl der Schrift und anderer Gestaltungselemente hervorgehoben werden. Ohnehin spielt die Visualisierung eine entscheidende Rolle. Sie ist nicht nur als nachgeschaltete Verschönerung zu verstehen, sondern trägt maßgeblich zur Qualität einer Technologie-Roadmap bei. In diesem Zusammenhang sprechen Phaal und Müller (2017) von einer „visuellen Strategie“ und auch Möhrle und Isenmann (2017) betonen das Wechselspiel in der grafischen Konzeption. Beim Technologie-Roadmapping wird eine Fülle von Informationen gesammelt, strukturiert und verdichtet. Anschließend müssen die Ergebnisse aber auch grafisch angemessen aufbereitet werden.

Der Prozess der Visualisierung erhöht die Kreativität und stärkt den Blick für Alternativen, weil Perspektiven reflektiert werden, die über das Tagesgeschäft hinausgehen (Möhrle/Isenmann 2017, S. 8–10). Im Laufe der Zeit sind einige Beispielsammlungen entstanden, die der Praxis als hilfreiche Handreichungen dienen (vgl. Lee/Park 2005; Eppler/Platts 2009; Phaal/Müller 2009; Zurcher/Kostoff 1997).

---

5 Gute Beispiele sind die Halbleiter- oder Telekommunikationsbranche.

Abbildung 3: Generalisiertes Rahmenkonzept für Technologie-Roadmaps



Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an Phaal et al. (2011)

## 2.3 Methodik

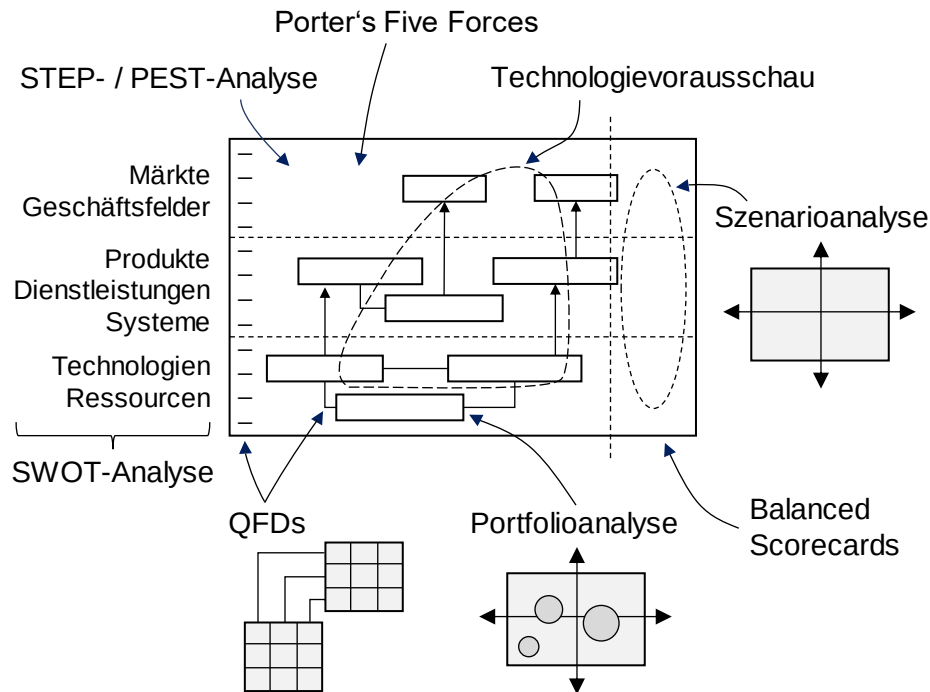
Ein wesentlicher Vorteil des Technologie-Roadmapping besteht auch darin, die Methode mit anderen Prognose- und Analysewerkzeugen wie *Balanced Scorecards*, der *Szenariotechnik*, der *SWOT-Analyse*, *Technologie- und Produktportfolios*, den *Porter's Five Forces* oder *Qualitätsfunktionsendarstellungen (QFDs)* verknüpfen zu können. Wann immer bestimmte Faktoren einer Technologieentwicklung genauer untersucht werden sollen, kann die Methode um weitere Instrumente ergänzt werden (siehe Abbildung 4). Dadurch wird dem Technologie-Roadmapping eine wertvolle, instrumentelle Brückenfunktion zuteil (vgl. Möhrle/Isenmann 2017, S. 11–12).

Das Technologie-Roadmapping vereint sowohl quantitative als auch qualitative Forschungsansätze. Schon das Spektrum weiterer Instrumente, die integriert werden können (siehe Abbildung 4), spricht für eine breite methodische Vielfalt. Im Rahmen quantitativer Ansätze werden Technologiedaten zusammengefasst, strukturiert und ausgewertet. Auch indirekte Technologie-, Produkt- und Marktbeziehungen werden dabei untersucht, etwa in Form sogenannter „Technology-Industry Maps“, die Unternehmen gemäß ihrer Branchenzugehörigkeit ordnen, oder sogenannter „Portfolio-Affinity Maps“ (vgl. Lee et al. 2009), die eine strukturierte Übersicht von Technologie- und Produktportfolios zeigen.

Mehrfach werden die Möglichkeiten auch durch Bayessche Netze (Lee et al. 2010) oder Text Mining und Patentanalysen (Lee et al. 2009; Choi et al. 2013) erweitert. Datenbasierte Methoden bieten den Vorteil, mögliche Entwicklungspfade aus objektiver Sicht beschreiben zu können. Allerdings sind nicht alle Bestandteile einer Technologieentwicklung numerisch greifbar, insbesondere dann, wenn ihr disruptives Potenzial überhaupt erst erkannt und beschrieben werden muss. Beim Technologie-Roadmapping werden deshalb auch qualitative Ansätze genutzt. In freien oder semi-strukturierten Interviews und fachübergreifenden Workshops werden dafür Expertenmeinungen gesammelt und die darin getroffenen Hypothesen reflektiert.

Das Einbeziehen von Experten ist zeit- und kostenintensiv, für das Technologie-Roadmapping aber essenziell, auch deshalb, weil die Methode nicht automatisiert werden kann (Jin/Jeong/Yoon 2015, S. 127; 137). Wenn möglich, sollten quantitative und qualitative Ansätze miteinander kombiniert werden, um deren Vorteile gemeinsam nutzen zu können.

Abbildung 4: Die instrumentelle Brückenfunktion des Technologie-Roadmapping



Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an Phaal (2019)

Nicht alles am Technologie-Roadmapping ist also völlig neu. Auch schon vor seinen Anfängen griffen Führungs- und Fachkräfte auf langfristorientierte Planungsinstrumente zurück. Allerdings verkörpert die Methode mindestens fünf Besonderheiten:

1. Eine visuelle Dokumentation stärkt das Bewusstsein für unerkannte Entwicklungspotenziale, weil Sachverhalte expliziert und neue Sichtweisen eingenommen werden.
2. Das Technologie-Roadmapping führt unterschiedliche Fachrichtungen über Abteilungs- und Unternehmensgrenzen hinweg zusammen und bestärkt damit die Konsensbildung.
3. Die Methode hat eine instrumentelle Brückenfunktion, weil sie mit anderen Analysewerkzeugen verknüpft werden kann, regelmäßig in die strategische Planung integriert und an computergestützte Auswertungsverfahren gekoppelt wird (Möhrle/Isenmann 2017, S. 10–13).
4. In der Strategie- und Innovationsplanung ist die Zeit ein entscheidender Faktor, wird aber in vielen anderen Methoden der strategischen Beratung – wie der SWOT- oder Portfolioanalyse – ausgeklammert. Beim Technologie-Roadmapping ist die Zeit hingegen eine feste Dimension (vgl. Phaal 2019).

5. Im Unterschied zu vielen anderen Formen der Zukunftsschau können normative Zielvorstellungen einbezogen werden (vgl. Steinmüller 2017, S. 31–32), so dass auch übergeordnete Fragestellungen Beachtung finden: Was sind die Chancen und Risiken einer neuen Technologie? Welche Interessen haben Unternehmen, Arbeitnehmer und die Gesellschaft? Sollten bestimmte Technologiepfade politisch begleitet werden?

### 2.3.1 Phasen der Erstellung

Die Konzeption von Technologie-Roadmaps wird in der Literatur sehr unterschiedlich beschrieben. Tabelle 1 fasst die einzelnen Phasen gemäß verschiedenen Forschungsbeiträgen zusammen. Der erste Aufzählungspunkt markiert jeweils den Beginn und der letzte das z. T. offene Ende des Erstellungsprozesses. Die Auflistung entstammt den Ergebnissen einer bibliometrischen Analyse von Carvalho et al. (2013), im Rahmen derer 79 Forschungsbeiträge zum Technologie-Roadmapping mittels Text-Mining untersucht wurden.

Offensichtlich gibt es sehr unterschiedliche Meinungen darüber, welche Schritte die Erstellung einer Technologie-Roadmap umfasst (siehe Tabelle 1), was auch daran liegen dürfte, dass die zitierten Beiträge grundverschiedene Anwendungsfälle beschreiben. Dennoch lassen sich einige Gemeinsamkeiten erkennen: Immer wieder stehen die Vorbereitung, fachübergreifende Erstellung und abschließende Implementierung im Mittelpunkt. Auch die Nachbereitung und kontinuierliche Fortschreibung sowie Verfeinerung der Szenarien werden häufig genannt. In der Praxis hat sich bis heute das Arbeiten mit Postern, Klebezetteln, Schreibmitteln und ähnlichen Utensilien bewährt.

Die Möglichkeiten werden auch durch moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ergänzt. Mittels spezieller Computer-Software kann die Effizienz der Erstellung erhöht und die nachgeschaltete Pflege, Aktualisierung und Fortschreibung erleichtert werden (Möhrle und Isenmann 2017, S. 8–10) – klassische Officeanwendungen sind dafür aber ebenso geeignet. Auf Grundlage der genannten Beiträge und unserer Erfahrungen stellen wir in Tabelle 3 ein eigenes Erstellungsschema vor.

Tabelle 1: Phasen des Technologie-Roadmapping

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Amer und Daim (2010); Gerdtsri et al. (2009); Saritas und Aylen (2010)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initiierung und Vorbereitung</li> <li>• Entwicklung der Technologie-Roadmap(s)</li> <li>• Integration und Nachbereitung</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Daim und Oliver (2008)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifikation von Markttreibern</li> <li>• Identifikation geeigneter Produkte und Dienstleistungen</li> <li>• Identifikation von Technologien zur Entwicklung der Produkte und Dienstleistungen</li> <li>• Ausarbeitung von Abhängigkeiten zwischen den vorherigen drei Schritten</li> <li>• Entwicklung eines Plans zur Akquirierung oder Entwicklung der Technologien</li> <li>• Zuweisung von Ressourcen, die für die Umsetzung des Plans erforderlich sind</li> </ul> |
| <b>Lee et al. (2007)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initiierung</li> <li>• Themenauswahl</li> <li>• Beschreibung technologischer Erfordernisse</li> <li>• Entwicklung eines Technologieplans</li> <li>• Implementierung</li> <li>• Nachbereitung</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Ma et al. (2006)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bildung von Personengruppen</li> <li>• Einschätzungen aus Sicht von Wissensmanagern</li> <li>• Beschreibung des aktuellen Stands</li> <li>• Beschreibung der Kompetenzen aller Beteiligten und Festlegung einer einheitlichen Struktur</li> <li>• Entwicklung eines Forschungsplans</li> <li>• Implementierung und Überprüfung</li> </ul>                                                                                                                                  |
| <b>Phaal et al. (2011)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Umweltanalyse</li> <li>• Organisationsanalyse</li> <li>• Entwicklung der Technologie-Roadmap</li> <li>• Gemeinsame Forschungsstrategie und einheitlicher Forschungsrahmen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                       |



**Strauss und Radnor (2004)**

- Spezifikation der Annahmen
- Bewertung der Treiber von Umweltveränderungen
- Bewertung der strategischen Implikationen der vorherigen Phase
- Beschreibung gemeinsamer Themenbereiche
- Entwicklung von Szenarien
- Konzeption grober Entwicklungspfade für die Szenarien
- Definition von Kontrollpunkten
- Berücksichtigung möglicher Veränderungen der Aufgaben, Entscheidungen und Ressourcen
- Identifikation unternehmerischer Treiber
- Abschätzung der Zeit, in der eine auf ein Szenario angepasste Strategie umgesetzt werden kann
- Definition flexibler Entwicklungspunkte
- Übertragung der Aufgaben, Indikatoren, externen Faktoren, Entscheidungs- und Kontrollpunkte
- Ausgestaltung der Technologie-Roadmap
- Kontinuierliche Verfeinerung der Szenarien
- Regelmäßige Neubewertung der Szenarien

*Quelle: eigene Tabelle, in Anlehnung an Carvalho et al. (2013, S. 1429)*

In der Literatur werden auch Kriterien für den Erfolg des Technologie-Roadmapping diskutiert (siehe Tabelle 2). Ausschlaggebend ist die Einbeziehung verschiedener Fachrichtungen und Kompetenzen, die Einsatzbereitschaft der beteiligten Akteure, der Blick für technische und marktspezifische Herausforderungen sowie die konzeptionelle Klarheit; doch auch hier hat sich kein einheitlicher Standard etabliert.

Nach einer Befragungsstudie von Phaal und Farrukh (2000) entfaltet die Methode auch erst dann ihren vollen Nutzen, wenn sie in das Tagesgeschäft integriert und mit anderen Instrumenten verknüpft wird. Andernfalls könne die erwünschte Wirkung verpuffen und von den üblichen, operativen Aufgaben überlagert werden.

Tabelle 2: Qualitätskriterien von Technologie-Roadmaps

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Elliott (2005)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbeziehung von Fachleuten</li> <li>• Selbstverpflichtung der Auftragsteller zur Mitarbeit</li> <li>• Erfolgreiche Implementation der Schlussfolgerungen einer Roadmap</li> <li>• Plan zur Erhöhung der Teilhabebereitschaft</li> <li>• Realistische Abbildung nicht-technologischer Barrieren</li> <li>• Umfassende Beschreibung konkurrierender Technologieentwicklungen</li> </ul>                         |
| <b>Kostoff et al. (2004)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatzbereitschaft der Geschäftsleitung</li> <li>• Funktionen des Roadmapping-Managers</li> <li>• Kompetenzen der beteiligten Akteure</li> <li>• Ausrichtung auf die Interessen der beteiligten Gruppen</li> <li>• Normierung und Standardisierung</li> <li>• Kriterien der Roadmap</li> <li>• Verlässlichkeit</li> <li>• Relevanz zukünftiger Handlungen</li> <li>• Kosten</li> <li>• Datenschutz</li> </ul> |
| <b>Lee et al. (2007)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration der Roadmap mithilfe bestehender Steuerungsinstrumente</li> <li>• Identifikation neuer Ansätze zur Steigerung der Effizienz und Effektivität der Roadmapping-Prozesse</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>McMillan (2003)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Klarheit über die Adressaten</li> <li>• Kompetenz der ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen (Werkstoffkunde, Energietechnik, etc.)</li> <li>• Marktvoraussetzungen</li> <li>• Kernkompetenzen</li> <li>• Technologische Zeitplanung</li> </ul>                                                                                                                                                               |

| <b>Yamashita et al. (2009)</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beteiligung der Verwaltung und Strategieleitung</li> <li>• Maßgeschneiderte Lösungsmodelle</li> <li>• Internetbasierte Softwareunterstützung</li> <li>• Werkzeuge der Visualisierung</li> <li>• Simulationen</li> <li>• Kritischer Diskurs</li> <li>• Brainstorming</li> <li>• Einheitliche Struktur</li> </ul> |

Quelle: eigene Tabelle, in Anlehnung an Carvalho et al. (2013, S. 1429)

Tabelle 3: Erstellungsschema für das Technologie-Roadmapping

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.</b> | <b>Vorbereitung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswahl der Technologieentwicklung</li> <li>• Beschreibung der Methodik</li> <li>• Planung der Experteninterviews und -workshops</li> <li>• Literatur- und Praxisrecherche</li> <li>• Erster, grober Entwurf der Technologie-Roadmap(s)</li> </ul>                                |
| <b>2.</b> | <b>Analyse</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantitativ: Auswertung der Expertenmeinungen</li> <li>• Qualitativ: Datenanalysen, z. B. durch Text-Mining oder Bayessche Netze</li> <li>• Abgleich der ersten, groben Technologie-Roadmap(s)</li> <li>• Bei Bedarf Erweiterung um andere Analyse- und Prognosewerkzeuge</li> </ul>   |
| <b>3.</b> | <b>Entwicklung und Auswertung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grafische Konzeption der Technologie-Roadmap(s)</li> <li>• Spezifizierung des zeitlichen Horizonts und von Abhängigkeiten</li> <li>• Identifikation der Treiber der Technologieentwicklung</li> <li>• Erkennen der eigenen Chancen und Herausforderungen</li> </ul> |
| <b>4.</b> | <b>Integration</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration der Erkenntnisse in die strategische Planung</li> <li>• Verteilung von Aufgaben und Kompetenzen</li> </ul>                                                                                                                                                             |
| <b>5.</b> | <b>Nachbereitung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regelmäßige Neubewertung und Anpassung der Szenarien</li> <li>• Kritische Reflexion der strategischen Planung</li> </ul>                                                                                                                                                         |

Quelle: eigene Tabelle

### 2.3.2 Unsicherheiten in der Zukunftsforschung

Das Technologie-Roadmapping verkörpert immer auch ein spekulatives Moment, schließlich sind Technologieentwicklungen per se unsicher. Damit widerspricht die Methode – wie auch andere Formen der Zukunftsschau – dem traditionellen Wissenschaftsverständnis. Künftige Entwicklungspfade lassen sich aus heutiger Sicht nämlich weder beobachten noch experimentell überprüfen. Diese Ungewissheit begründet aber auch die Notwendigkeit einer zukunftsorientierten Forschung, denn erst durch die Beschreibung möglicher Entwicklungspfade wird die Voraussetzung für bewusste Einflussnahmen geschaffen (Steinmüller 2017, S. 31).

Unsicherheiten umfassen ein Spektrum sowohl positiver als auch negativer Entwicklungen, das erkannt werden muss, bevor strategische Entscheidungen getroffen werden (Mitchell/Phaal/Athanassopoulou 2018, S. 8). Die Zukunftsforschung setzt dort an, wo kurzfristige Planungs- und Prognosedisziplinen enden und befasst sich mit langfristigen, strukturellen Veränderungen, Trendbrüchen, externen Störereignissen und Disruptionen. Es werden Prozesse des gesellschaftlichen Wandels skizziert, die über inkrementelle Veränderungen und normale Trends hinausgehen (Steinmüller/Steinmüller 2004).

Der ganzheitliche Ansatz des Technologie-Roadmapping ist auch deshalb vorteilhaft, weil auf lange Sicht fast alle Branchen nicht nur den eigenen, sondern auch erheblichen Veränderungen ihres Umfelds unterworfen sind. Trotz einiger Mutmaßungen ist das Technologie-Roadmapping den üblichen Kriterien der Wissenschaftlichkeit verpflichtet<sup>1</sup> (Steinmüller 2017).

## 2.4 Forschungsüberblick

Mit der Zeit sind zahlreiche Forschungsarbeiten und Praxisprojekte zum Technologie-Roadmapping entstanden, darunter Fallbeispiele aus der Automobil- und Energiebranche (Grossman 2004; Amer/Daim 2010; Tuominen/Ahlqvist 2010), mobilen Kommunikation (Richey/Grinnell 2004; Pagani 2009; An/Lee/Park 2008; Donnelly 2006), chemischen Produktion (Phaal/Farrukh/Probert 2004b; Lichtenthaler 2008), Softwareentwicklung (Suomalainen et al. 2011), Pharmazeutik (Tierney/Hermine/Walsh 2013), Nanotechnologie (Martin/Daim 2008), Nanophotonik (Kirchain/Kimerling

---

<sup>1</sup> Gemeint sind die methodische Transparenz, allgemeine Nachvollziehbarkeit, Explikation der Prämissen, terminologische Eindeutigkeit, logische Konsistenz und praktische Relevanz (vgl. Gerhold et al. 2015).

2007), Energiegewinnung aus Wasserstoff (McDowall 2012), Telekommunikation (Kani et al. 2009), dem Bergbau (Amadi-Echendu et al. 2011), Polizeiwesen (Elliott 2005) und der Wissenschaft (Ma/Liu/Nakamori 2006).

Daneben haben sich auch einige Regierungsbehörden an der Entwicklung von Technologie-Roadmaps beteiligt. Das US-amerikanische Energieministerium präsentiert eine Liste von Projekten, die seit dem Jahr 2000 entstanden sind (U.S. Department of Energy 2019). Auch die kanadische Regierung hat zahlreiche Roadmaps zu Nachhaltigkeitsthemen veröffentlicht (Government of Canada 2006).

Als besonderes Beispiel gilt das japanische *Ministerium für Wirtschaft und Industrie*, das „Strategic Technology Roadmaps“ (kurz: *STR*) – ein Begriff den Yasunaga et al. (2009) prägten – in insgesamt 25 Bereichen entwickelt. Dazu zählen die Robotik, Brennstoffzellentechnik, erneuerbare Energiegewinnung, nachhaltige Biotechnologie, Bindung und Nutzung von CO<sub>2</sub>, Medizintechnik, Krebsbekämpfung sowie Luft- und Raumfahrt<sup>2</sup> (Yasunga/Watanabe/Korenaga 2009, S. 67).

Zusätzlich wurden Beiträge zur theoretischen Integration der Methode in die Managementtheorie publiziert (Lee et al. 2008; Fenwick/Daim/Gerdsri 2009; Choi et al. 2013). Phaal et al. (2007) beschreiben einen sogenannten „S-plan“, der die strategische Unternehmensausrichtung und Erkundung neuer Geschäftsmöglichkeiten unterstützt. Vor dem Hintergrund „offener Innovationen“ stellt Lichtenthaler (2008) eine Roadmap zur kommerziellen Nutzung externer Technologieverwertungen im unternehmerischen Kontext vor und leistet damit einen Beitrag zur Integration der Methode in neue Wissenschaftstrends. Die Verknüpfung mit weiteren Disziplinen wie der Volkswirtschaftslehre oder Psychologie stellt bisher noch große Forschungslücken dar.

---

2 Es gibt keine vergleichbare Beteiligung der deutschen Bundesregierung an der Konzeption von Technologie-Roadmaps.

## 3. Die Technologien des autonomen Fahrens

Das dritte Kapitel dieser Studie führt in das automatisierte und autonome Fahren ein. Zu Beginn werden die bisherige Entwicklung von Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsystemen seit den 1970er Jahren zusammengefasst und eine weit verbreitete Taxonomie von Automatisierungsleveln vorgestellt. Anschließend werden die Sensoren und technischen Zusatzsysteme autonomer Fahrzeuge beschrieben und in einem Schaubild zusammengetragen. Die Frage der zeitlichen Realisierbarkeit des autonomen Fahrens, die aus industriepolitischer und gesellschaftlicher Sicht besonders relevant ist, wird abschließend diskutiert.

### 3.1 Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsysteme

In der Automobilbranche sind technische Assistenzsysteme keine Neuheit. Schon heute sind in vielen Kraftfahrzeugen bis zu 100 elektronische Module verbaut, die neben der Motorsteuerung auch einzelne Fahrfunktionen unterstützen oder sogar übernehmen (VDA 2018a). Im Jahr 2016 lag das weltweite Marktvolumen teil- und vollautomatisierter Assistenzsysteme bei 15 Milliarden US-Dollar (Heineke et al. 2017, S. 1) und die deutsche Automobilindustrie spielt seit vielen Jahren eine führende Rolle in deren Entwicklung.

Schon 1978 wurde hierzulande das Antiblockiersystem (ABS), das ein Blockieren einzelner Räder bei Notbremsungen verhindert, großserientauglich eingeführt – sieben Jahre später das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), das instabile Fahrsituationen durch gezielte Bremsengriffe und Drosselungen der Motorleistung ausgleicht. Mittlerweile sind sowohl ABS als auch ESP, die zu den sogenannten *Fahrsicherheitssystemen* zählen, in vielen Ländern gesetzlich vorgeschrieben. Seit 2018 gilt das auf europäischer Ebene auch für das automatische Notrufsystem „eCall“. (VDA 2018a; 2018b)

Immer häufiger werden auch sogenannte *Fahrerassistenzsysteme* verbaut, die nicht nur die Fahrsicherheit, sondern auch den Fahrkomfort erhöhen. Darunter fallen Geschwindigkeitsregelanlagen (Tempomate), elektronische Einparkhilfen und adaptive Kurvenlichter. Noch komplexere

Systeme übernehmen selbst dynamische Fahraufgaben<sup>3</sup> und gelten als Vorstufe des autonomen Fahrens: (VDA 2018a; 2018b)

- *Abstandsregeltempomate (seit 2006)*: Durch automatisches Abbremsen und Beschleunigen wird ein gleichbleibender Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug eingehalten.
- *Parkmanöverassistenten (seit 2006)*: Automatisches Ein- und Ausparken mithilfe von Videokameras und Ultraschallsensoren.
- *Automatische Notbremsassistenten (seit 2008)*: Automatische Bremsmanöver, wenn ein Zusammenstoß mit Personen, Tieren, Objekten oder anderen Fahrzeugen droht.
- *Spurhalteassistenten (seit 2014)*: Automatisches Anzeigen oder gar Verhindern unbeabsichtigter Spurwechsel. (Mosquet et al. 2015, S. 6)

Die bisherige Chronologie von Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsystemen wird in Abbildung 5 zusammengefasst (linke Spalte). Neben den bereits genannten Technologien sind viele weitere aufgeführt, die immer häufiger zur Serienausstattung gängiger Fahrzeugklassen zählen. Auch die Vernetzung mit dem Internet, digitalen Navigationsdiensten und mobilen Endgeräten hat über die Jahre deutlich zugenommen. In Abbildung 5 wird zwischen Vernetzungssystemen für die Fahrzeugtechnik und solchen für das Infotainment unterschieden (rechte Spalte).

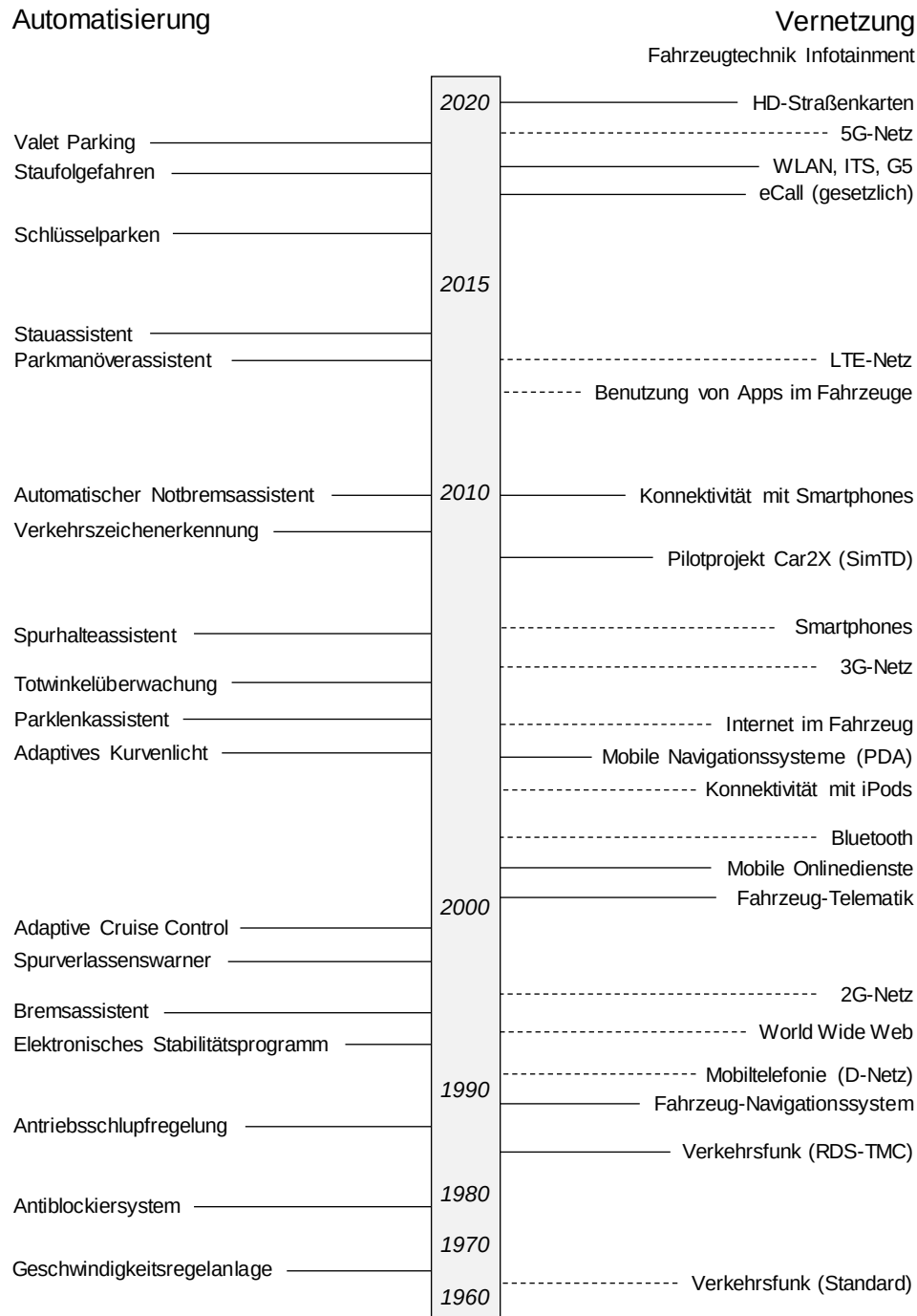
## 3.2 Automatisiertes und autonomes Fahren

Die Weiterentwicklung von Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsystemen könnte in Zukunft das „autonome Fahren“ – manchmal auch „automatisches“ (vgl. Form 2016) oder „pilotiertes Fahren“ (vgl. Audi 2014) – im breiten Straßenverkehr ermöglichen. Wird der menschliche Fahrer nur entlastet, aber noch nicht ersetzt, wird vom „automatisierten Fahren“ gesprochen (vgl. VDA 2018). Im Folgenden werden autonome Fahrzeuge definiert, eine Taxonomie von Automatisierungsleveln beschrieben und die Zusatzsysteme autonomer Fahrzeuge zusammengefasst.

---

3 *Dynamische Fahraufgaben* umfassen die Gesamtheit aller operativen und taktischen Fahraktivitäten. Der Begriff wird in Abschnitt 2.3 genauer definiert.

Abbildung 5: Automatisierungs- und Vernetzungssysteme in Kraftfahrzeugen



Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an VDA (2018a)



### 3.2.1 Definitionen und Automatisierungslevel

Autonome Fahrzeuge sind mit technischen Sensoren und Zusatzsystemen ausgestattet, um ohne Mitwirken eines menschlichen Fahrers zielgerichtet fahren zu können (VDA 2018). Der Begriff der Autonomie ist vom altgriechischen *autonomía* für „Eigengesetzlichkeit“ oder „Selbständigkeit“ abgeleitet. Tatsächlich impliziert schon die Bezeichnung Automobil, die vom griechischen *autós* für „selbst“ und lateinischen *mobilis* für „beweglich“ abstammt, die selbständige Fortbewegung von Kraftfahrzeugen; im historischen Kontext war damit aber das motorisierte Fahren ohne den bis dahin üblichen Einsatz von Pferden und anderen Nutztieren gemeint. Durch die Ergänzung um technische Sensorik und computergestützte Algorithmen wird der Automobilbegriff neuerdings präzisiert.

Das automatisierte und autonome Fahren umfasst ein breites Spektrum assistierter Fahrmodi. Allerdings ist die Differenzierung herkömmlicher und selbstfahrender Autos nicht eindeutig, sondern beschreibt ein Kontinuum aufeinander aufbauender Automatisierungslevel. In der internationalen Forschung und Praxis hat sich die Taxonomie der *Society of Automotive Engineers* (SAE) für automatisierte und autonome Kraftfahrzeuge etabliert, die zwischen den Leveln „Keine Automatisierung“, „Fahrassistenz“, „Teilautomatisierung“, „Bedingte Automatisierung“, „Hochautomatisierung“ und „Vollautomatisierung“ von 0 bis 5 unterscheidet. (SAE International 2014, S. 2) Auch die deutsche Bundesanstalt für Straßenwesen folgt dieser Abstufung in ähnlicher Nomenklatur<sup>4</sup> (BASt 2012).

Eine möglichst einheitliche Klassifizierung beugt Missverständnissen vor und erleichtert den fachübergreifenden Diskurs: es herrscht Konsens darüber, welche Fahrfunktionen je nach Automatisierungslevel vom Fahrzeug übernommen werden und welche beim menschlichen Fahrer verbleiben (SAE International 2014, S. 1). Nicht nur technische, sondern auch rechtliche und moralische Überlegungen bedürfen einer solchen Trennschärfe.

Tabelle 4 fasst die Automatisierungslevel – oder auch Automatisierungsstufen – gemäß der SAE-Klassifizierung zusammen. Die darin erwähnten *dynamischen Fahraufgaben*, *Fahrmodi*, *Aufforderungen zum Eingreifen* und der Begriff des *Systems* sind folgendermaßen definiert:

- *Dynamische Fahraufgaben*: Gesamtheit aller operativen und taktischen Fahraktivitäten. Erstere umfassen das Lenken, Bremsen, Beschleunigen und Überwachen des Fahrumfelds. Taktische Fahraktivitäten beinhalten wiederum das angemessene Reagieren auf spezifi-

---

4 Die Bundesanstalt für Straßenwesen nennt Stufe 0 „Drivers only“, Stufe 1 „Assistiert“ und verzichtet auf die SAE-Stufe „Bedingte Automatisierung“ (vgl. BASt 2012).

sche Fahrsituationen, Wechseln von Fahrspuren, Abbiegen sowie Erkennen von Ampelschaltungen und Verkehrsschildern. Strategische Fahrentscheidungen im Sinne der Zielbestimmung und Auswahl der Wegstrecken zählen *nicht* zu den dynamischen Fahraufgaben.

- *Fahrmodi*: Fahrszenarien, die charakteristische, dynamische Fahraufgaben erfordern. Dazu zählen das Auf- und Abfahren von Autobahnen, das gleichbleibende Fahren bei hohen sowie Staufahren bei niedrigen Geschwindigkeiten und das Fahren in geschlossenen und eindeutig definierten Verkehrsabschnitten.
- *Aufforderungen zum Eingreifen*: Akustische, visuelle oder taktile Aufforderungen der technischen Systeme an den menschlichen Fahrer, die dynamischen Fahraktivitäten zu übernehmen.
- *System*: Einzelne oder kombinierte Assistenzsysteme ohne oder mit autonomen Funktionsweisen. Kurzfristige Warn- und Kontrollsysteme, die keine dynamischen Fahraktivitäten übernehmen, sind davon ausgenommen. (SAE International 2014, S. 2)

Tabelle 4: SAE-Klassifizierung für das automatisierte und autonome Fahren

| SAE-Level                                    | Bezeichnung           | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                           | Lenken, beschleunigen, bremsen | Beobachtung Fahrumfeld | Dynamisches Fahren | Systemfähigkeit |
|----------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|-----------------|
| Menschlicher Fahrer überwacht das Fahrumfeld |                       |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                        |                    |                 |
| 0                                            | Keine Automatisierung | Ausführung aller dynamischen Fahraufgaben durch einen menschlichen Fahrer.                                                                                                                                                                             | Fahrer                         | Fahrer                 | Fahrer             | Keine Fahrmodi  |
| 1                                            | Fahrerassistenz       | Lenken oder beschleunigen bzw. bremsen durch Fahrerassistenzsysteme in spezifischen Fahrmodi mithilfe von Informationen über das Fahrumfeld. Es gilt die Annahme, dass der menschliche Fahrer alle anderen Elemente des dynamischen Fahrens übernimmt. | Fahrer und System              | Fahrer                 | Fahrer             | Einige Fahrmodi |

|                                                |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                              |               |               |               |                            |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 2                                              | <i>Teil-<br/>auto-<br/>mati-<br/>sierung</i>                | Lenken <i>und</i> beschleunigen bzw. bremsen durch Fahrerassistenzsysteme in spezifischen Fahrmodi mithilfe von Informationen über das Fahrumfeld. Es gilt die Annahme, dass der menschliche Fahrer alle anderen Elemente des dynamischen Fahrens übernimmt. | <i>System</i> | <i>Fahrer</i> | <i>Fahrer</i> | <i>Einige<br/>Fahrmodi</i> |
| Autonome Fahrsysteme überwachen das Fahrumfeld |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                              |               |               |               |                            |
| 3                                              | <i>Be-<br/>dingte<br/>Auto-<br/>mati-<br/>sie-<br/>rung</i> | Ausführung aller dynamischen Fahraktivitäten durch ein autonomes Fahrsystem. Es gilt die Annahme, dass der menschliche Fahrer auf Aufforderungen zum Eingreifen angemessen reagiert.                                                                         | <i>System</i> | <i>System</i> | <i>Fahrer</i> | <i>Einige<br/>Fahrmodi</i> |
| 4                                              | <i>Hoch-<br/>auto-<br/>mati-<br/>sie-<br/>rung</i>          | Ausführung aller dynamischen Fahraktivitäten durch ein autonomes Fahrsystem, auch dann, wenn der menschliche Fahrer nicht angemessen auf Aufforderungen zum Eingreifen reagiert.                                                                             | <i>System</i> | <i>System</i> | <i>System</i> | <i>Einige<br/>Fahrmodi</i> |
| 5                                              | <i>Voll-<br/>auto-<br/>mati-<br/>sie-<br/>rung</i>          | Vollständige Übernahme aller dynamischen Fahraktivitäten durch ein automatisiertes System unter allen Fahr- und Umweltbedingungen, die auch ein menschlicher Fahrer bewältigen könnte.                                                                       | <i>System</i> | <i>System</i> | <i>System</i> | <i>Alle Fahr-<br/>modi</i> |

Quelle: Eigene Tabelle. In Anlehnung an SAE International (2014, S. 2) und Bardt (2016, S. 41).

Die gezeigten Automatisierungslevel sind nur technisch-beschreibend und haben keinen normativen oder rechtlichen Charakter. Genauso implizieren sie keine bestimmte Reihenfolge der Markteinführung technischer Assistenzsysteme. In Abhängigkeit der in einer bestimmten Fahrsituation unterstützten Fahrfunktionen könnten automatisierte und autonome Fahrzeuge auch auf unterschiedlichen Automatisierungsleveln operieren (SAE International 2014, S. 2).

Die heutigen Abstandsregeltempomate, Parkmanöver-, Notbrems- und Spurhalteassistenten (siehe Abschnitt 3.1) gehen bereits über die reine Fahrassistenz hinaus und begründen eine Teilautomatisierung nach Level 2. Gemäß der SAE-Klassifizierung ist der darauffolgende Übergang zu Level 3 wesentlich, weil damit die Überwachung des Fahrumfelds vom menschlichen Fahrer auf die technischen Systeme übergeht (siehe Tabelle 4). Die Experten, die für diese Studie befragt wurden, gehen mehrheitlich davon aus, dass diese Entwicklung kurz bevorsteht. Ab wann automatisierte Fahrzeuge der Level 3 und höher am Markt verfügbar sein könnten, wird in Abschnitt 3.4 genauer diskutiert.

Weil Fahrerassistenzsysteme schon heute weit verbreitet sind (siehe Abschnitt 3.1), plädieren unter anderen der Verband der Automobilindustrie (VDA) und der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC) für eine vereinfachte Klassifizierung mit nur drei Automatisierungsstufen. Demnach beschreibt Stufe 1 das *assistierte Fahren*, bei dem der menschliche Fahrer kleinere Nebentätigkeiten ausführen darf, das Fahrzeug aber immer beherrschen können muss; Stufe 2 das *automatisierte Fahren*, bei dem die technischen Systeme alle Fahraufgaben übernehmen, der menschliche Fahrer aber in der Lage sein muss, auf kurzfristige Aufforderungen zum Eingreifen zu reagieren; und Stufe 3 das *autonome Fahren*, bei dem das Fahrzeug sämtliche Fahraktivitäten dauerhaft übernimmt und auch ein Fahrbetrieb ohne Insassen möglich ist. (VDA 2018; ADAC 2018a)

Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien orientiert sich diese Studie an der zuvor beschriebenen SAE-Klassifizierung: die sechs Automatisierungslevel bilden die Hauptfahrspur der späteren Technologie-Roadmaps.

### 3.2.2 Die Technologien autonomer Fahrzeuge

Für das autonome Fahren werden Kraftfahrzeuge mit technischen Sensoren und Zusatzsystemen ausgestattet, um die Fahraktivitäten menschlicher Fahrer ausüben zu können. Wie schon heute üblich, erfolgt die Lokalisierung über ein satellitengestütztes Navigationssystem wie das GPS

(*Global Positioning System*)<sup>5</sup>. Die Lageschätzung eines Fahrzeugs, also Schätzungen zu dessen Position und Orientierung, wird auch durch Messungen der Radumdrehungen – die sogenannte *Odometrie* – unterstützt (Heineke et al. 2017).

Genauso werden auch zur Erkennung des Fahrumfelds mehrere Teilsysteme miteinander kombiniert, um deren Stärken gemeinsam nutzen und mögliche Ausfälle kompensieren zu können. Dieses Prinzip wird als *technische* und hier im Speziellen als *heiße Redundanz* bezeichnet, weil die Systeme ähnliche Funktionen übernehmen und gleichzeitig aktiv sind (BSI 2018, S. 9).

Zuallererst kann das Fahrumfeld über das Aussenden und Einfangen elektromagnetischer Wellen im Radiofrequenzbereich mittels *Radars* (*radio detection and ranging*) überwacht werden – viele der heutigen Abstandregeltempomate funktionieren auf diese Weise. Radarmessungen haben eine hohe Reichweite und Robustheit gegenüber äußeren Umwelteinflüssen, sind aber für die vollständige Erkennung des Verkehrsumfelds zu ungenau (Lexikon der Physik 1998a). Die meisten Hersteller setzen deshalb auch auf das radarähnliche, aber deutlich genauere *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*)<sup>6</sup>, das Abstände und Geschwindigkeiten über die reflektierte Intensität und Verzögerung gepulster Laserstrahlen misst (Fraunhofer IMS 2019).

Zusätzlich werden *Mono- und Stereokameras* eingesetzt, mit deren Hilfe auch Ampelschaltungen und Verkehrsschilder interpretiert werden. Zur Personen- und Wildtiererkennung bei schlechten Lichtverhältnissen werden wiederum Infrarotsensoren genutzt. Der Infrarotbereich schließt an das langwellige Ende des sichtbaren Spektrums elektromagnetischer Strahlung an und umfasst Wellenlängen, die auch Körpertemperaturen erkennen lassen (Lexikon der Physik 1998b).

Zuletzt wird über die scharfe Bündelung von *Ultraschall* und dessen Reflexion, Brechung und Beugung im Raum eine Schalloptik betrieben, die besonders gut für den Nahbereich geeignet ist (Lexikon der Physik 1998c). Fast alle elektronischen Einparkhilfen und Parklenkassistenten basieren auf diesem Prinzip (vgl. Seat 2019; Ford 2019; Opel 2019).

Die gesammelten Sensordaten werden klassifiziert und mit Bewegungsprofilen verknüpft, um das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer im Fahrumfeld antizipieren zu können (siehe auch Abschnitt 3.2.3). Anschließend entscheiden technische Algorithmen über Fahrmanöver und

---

5 Das US-amerikanische Positionsbestimmungssystem GPS hat sich zu einer generischen Bezeichnung für alle Satellitennavigationssysteme entwickelt. Daneben gibt es auch die europäischen, russischen und chinesischen Alternativen Galileo, GLONASS und Beidou.

6 Manchmal auch Lidar (Weitkamp 2005) oder LIDAR (Lexikon der Physik 1998d).

die allgemeine Trajektorie des Fahrzeugs; die entsprechenden Befehle werden von der Aktorik in konkrete Fahrfunktionen umgesetzt.

Einige Hersteller arbeiten auch mit hochauflösenden Straßenkarten, auf denen sogar Bordsteinkanten und Häuserfassaden verzeichnet sind (vgl. HERE 2019)<sup>7</sup>. Eine leistungsstarke Recheneinheit (*CPU: Central Processor Unit*) verarbeitet die Daten in Echtzeit und steuert die Teilsysteme an. Über das Internet und den mobilen Datenstandard LTE<sup>8</sup> – oder zukünftig 5G<sup>9</sup> – können Verkehrsdaten, Straßenkarten oder auch die Software aktualisiert werden (Heineke et al. 2017, S. 5; Mosquet et al. 2015, S. 13; VDA 2018).

In Abbildung 6 werden die Zusatzsysteme autonomer Fahrzeuge noch einmal zusammengefasst und deren mögliche Platzierung im oder am Fahrzeug indiziert. Die darin erwähnte Car2X-Kommunikation wird in Abschnitt 3.3 erläutert. Bei LiDARs und GPS-Modulen variieren die Anschaffungskosten stark (siehe Abbildung 6). So liegt der Preis eines LiDARs mit nur einer Laserstrahllinie, wie es in der heutigen Fahrassistenz eingesetzt wird, bei etwa 90 USD; eins mit acht, das für das autonome Fahren benötigt wird, hingegen bei 75.000 USD (Mosquet et al. 2015, S. 13). Ähnliches gilt für GPS-Module mit unterschiedlichen Bestimmungsgenauigkeiten.

Im Sinne der technischen Redundanz setzen trotzdem fast alle Hersteller auf LiDARs (vgl. Audi 2019; BMW 2019; Daimler 2018), z. T. unter eigener Entwicklungsarbeit (vgl. Waymo 2019). Einzig der Elektrofahrzeughersteller Tesla vertraut stattdessen – neben Radar und Ultraschall – auf optische Kameras und den Einsatz einer künstlichen Intelligenz zur Rekonstruktion dreidimensionaler Umgebungsbilder (Tesla 2019).

Die Gesamtkosten aller Zusatzsysteme liegen bei rund 100.000 USD, könnten aber bei zunehmender Marktdurchsetzung und entsprechender Kostendegression mittelfristig auf 1.000 bis 3.000 USD fallen (Dellenback 2013). Auch die Erforschung neuer Produktionsverfahren dürfte dazu beitragen. Das Laboratorium für Nanotechnologie der Ben-Gurion-Universität in Israel hat eine neue Verfahrenstechnik vorgestellt, durch die der Preis für Infrarotsensoren von derzeit 3.000 auf unter 8 USD sinken könnte (Solomon 2018).

7 Der Geodatendienstleister HERE entwickelt Kartenmaterial mit über 9.900 Attributen (vgl. HERE 2019).

8 Die Mobilfunkstandards LTE (Long Term Evolution) und 4G (fourth generation der Next Generation Mobile Networks) werden häufig synonym verwendet. Tatsächlich entspricht das in Deutschland weit verbreitete LTE-Netz nur dem 3.9G-Standard.

9 5G (Fifth Generation der Next Generation Mobile Networks) ist die Weiterentwicklung der LTE- und 4G-Standards.

Abbildung 6: Übersicht autonomer Fahrzeugtechnologien

|                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>1</b><br><b>GPS</b><br><i>auf dem Dach</i><br>Lokalisierung über ein satelliten-gestütztes Navigationssystem. Genauigkeit innerhalb weniger Meter.<br>Kosten aktuell: \$80 - \$6.000 |  <b>2</b><br><b>LiDAR</b><br><i>auf dem Dach</i><br>Aussendung von Laserstrahlen zur Messung der Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer und Erstellung einer Umgebungskarte in hoher Auflösung.<br>Kosten aktuell: \$90 - \$75.000 |  <b>3</b><br><b>Videokameras</b><br><i>in alle Richtungen</i><br>Optische Detektion von Hindernissen und Erkennung von Verkehrsschildern, Ampelschaltungen und anderer Verkehrsinfrastrukturen.<br>Kosten aktuell: \$125 - \$150 (Mono)<br>\$150 - \$200 (Stereo) |  <b>4</b><br><b>Infrarot</b><br><i>vorne und seitlich</i><br>Detektion von Hindernissen bei schlechten Lichtverhältnissen, insbesondere zur Personen- und Wildtiererkennung.<br>Kosten aktuell: \$3.000 |  <b>5</b><br><b>Radar</b><br><i>vorne und seitlich</i><br>Detektion von Objekten und deren Geschwindigkeiten über das Aussenden und Einfangen elektromagnetischer Strahlung.<br>Kosten aktuell: \$125 - \$150 (nah)<br>\$50 - \$100 (weit) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



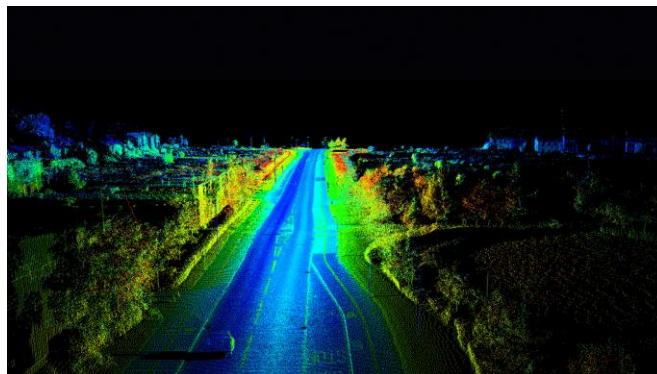
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>6</b><br><b>CPU und Software</b><br><i>Kofferraum / vorne</i><br>Steuerung der Teilsysteme, Verarbeitung der Sensordaten und Entscheidungsfindung.<br>Kosten aktuell: 50% - 200% der Gesamtkosten aller Sensoren. |  <b>7</b><br><b>Ultraschall</b><br><i>an allen Seiten</i><br>Detektion von Objekten im Nahbereich bei geringer Auflösung.<br>Kosten aktuell: \$15 - \$20. |  <b>8</b><br><b>Odometrie</b><br><i>Räder</i><br>Lageschätzungen des Fahrzeuges über die Anzahl der Radumdrehungen.<br>Kosten aktuell: \$80 - \$120 |  <b>9</b><br><b>Internet</b><br><i>Im Fahrzeug</i><br>Aktualisierungen der Straßenkarten, Verkehrsdaten und der Software über LTE oder 5G.<br>Häufig schon heute verbaut. |  <b>10</b><br><b>Car2X</b><br><i>Im Fahrzeug</i><br>Kommunikation mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur über LTE oder 5G, WLAN oder die DSRC.<br>Kosten aktuell: \$13,50 - \$15 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Quelle: eigene Abbildung, Informationen aus Heineke et al. (2017, S. 5), Mosquet et al. (2015, S. 13) und VDA (2018), Bild (bearbeitet) aus Uber (2019)

Luminar, ein im Jahr 2013 gegründetes Start-up, entwickelt LiDARs, deren Preis bei nur 500 USD liegen wird (Luminar 2019; Davies 2018) und das Unternehmen Cruise, das sich auf die Entwicklung selbstfahrender Automobiltechnologien spezialisiert hat, spricht nach der Übernahme von Strobe, einem LiDAR-Spezialisten, von einer Kostensenkung um 99 Prozent in der eigenen LiDAR-Produktion (Vogt 2017). Damit könnten die finanziellen Hürden einer privaten und kommerziellen Nutzung autonomer Fahrzeuge schon bald überwunden sein. Weil die jetzige Erforschung und Entwicklung der Zusatzsysteme einen großen Einfluss auf die zukünftigen Marktchancen der Unternehmen haben wird, bildet die Innovationskraft einen wichtigen Wettbewerbsfaktor in der späteren Marktanalyse.

Nachfolgend sind die Systemperspektiven verschiedener Erkennungssysteme abgebildet. Bild 1 zeigt eine dreidimensionale LiDAR-Umgebungskarte von BMW; Bild 2, das von Google stammt<sup>1</sup>, eine digitale Straßenkarte, auf die verschiedene Sensordaten projiziert wurden; und Bild 3 Teslas bereits erwähnter Ansatz zur räumlichen Rekonstruktion der Verkehrsumgebung durch optische Bildaufnahmen und den Einsatz einer künstlichen Intelligenz.

*Bild 1: Dreidimensionale Umgebungskarte eines LiDARs*



*Quelle: BMW 2019*

---

<sup>1</sup> Googles Projekt zur Entwicklung eines fahrerlosen Automobils (Google Driverless Car) wurde im Dezember 2016 in die neu gegründete Tochtergesellschaft Waymo ausgliedert, die der im Oktober 2015 aus Google hervorgegangenen Holding Alphabet angehört.

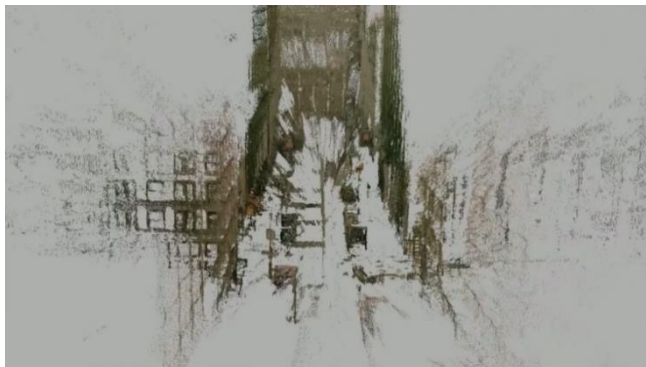


*Bild 2: Digitale Straßenkarte und Projektion verschiedener Sensordaten*



Quelle: Urmson 2015

*Bild 3: Räumliche Rekonstruktion der Umgebung durch Videoaufnahmen und eine Künstliche Intelligenz (Tesla 2019)*



Quelle: Tesla 2019

### 3.2.3 Die Bedeutung der Softwareentwicklung

Seit den 1970er Jahren hat der Anteil von Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsystemen in Kraftfahrzeugen deutlich zugenommen (siehe Abschnitt 3.1) und damit auch die Bedeutung der Informations- und Datenverarbeitung. Durch das autonome Fahren wird diese Entwicklung weiter zunehmen, weil sämtliche Fahrfähigkeiten, die bisher noch der menschliche Fahrer vollbringt, dann von technischen Algorithmen bewältigt werden sollen.

Der damit verbundene Softwareaufwand ist immens: In einem modernen, hochtechnisierten Auto der Oberklasse – wohlgemerkt aber noch kein autonomes Fahrzeug – stecken schon heute schätzungsweise

100 Millionen Programmzeilen. Das sind 2.500 Mal mehr als in einer durchschnittlichen iPhone-App (4.000 Programmzeilen), 250 Mal mehr als in einem Space-Shuttle (40.000 Programmzeilen), 20 Mal mehr als im Mars-Rover *Curiosity* (fünf Millionen Programmzeilen) und 15 Mal mehr als in der internen und externen Software einer Boeing 787 (14 Millionen Programmzeilen). Außer den Internetservices von Google (insgesamt zwei Milliarden Programmzeilen) gibt es keine andere technische Anwendung, die auf einem so großen Softwareeinsatz wie moderne Kraftfahrzeuge basiert (vgl. McCandless/Doughty-White/Quick 2015).

In der Softwareentwicklung ist die Anzahl der erstellten Programmzeilen (*LOC: Lines of Code*) pro Zeit ein häufiges, wenn auch ungenaues Maß der Produktivität<sup>2</sup>, das laut McConnell (2004) bei zehn bis 50 Programmzeilen pro Arbeitstag liegt – inklusiver aller anderen Projektstätigkeiten. Bei dessen Mittelwert von 30 und jährlich 220 Arbeitstagen<sup>3</sup> entsprechen 100 Millionen Programmzeilen einem bisherigen Entwicklungsaufwand von über 15.000 Personenjahren.

Der durch das autonome Fahren weiter steigende Softwareeinsatz ist vor allem im maschinellen Lernen begründet, also der künstlichen und empirischen Generierung von Wissen; das übergeordnete Teilgebiet der Informatik ist die *Künstliche* oder *Artifizielle Intelligenz*. Die Erkennungssysteme autonomer Fahrzeuge müssen drei wesentliche Fähigkeiten beherrschen:

1. Erkennung von Objekten im Fahrumfeld
2. Klassifizierung der Objekte
3. Lokalisierung der Objekte und Erstellung von Bewegungsmustern

Das maschinelle Lernen greift auf eine Vielzahl verschiedener Typen von Algorithmen zurück, von denen einige für autonome Fahren besonders geeignet sind: Entscheidungsbäume (*Decision Matrix Algorithms*) wie das *AdaBoost*<sup>4</sup>; Clusteringalgorithmen (*Cluster Algorithms*) wie *K-Means*; Klassifikationsalgorithmen (*Pattern Recognition Algorithm*) wie *Support Vector Machines*; und Regressionsalgorithmen (*Regression Algorithm*) über neuronale Netzwerke (Ravindra 2017)<sup>5</sup>.

---

2 Alternativ begründete McCabe (1976) die „zyklomatische Komplexität“, eine Software-Metrik, mit der die Anzahl aller Binärverzweigungen oder aller Knoten und Kanten im Kontrollflussgraphen eines Software-Moduls bestimmt wird. Albrecht (1979) entwickelte das „Function-Point-Verfahren“, das die Transaktionstypen Eingabe, Ausgabe und Abfrage eines informationstechnischen Systems misst.

3 Ein für Deutschland üblicher Wert für ein Arbeitsjahr, der sich aus einem Kalenderjahr abzüglich aller Wochenenden und Urlaubstage ergibt.

4 Kurzform von Adaptive Boosting

5 Ravindra (2019) präsentiert eine Übersicht der genannten Typen von Algorithmen und Janai et al. (2017) eine detaillierte Einführung in die computergestützte Mustererkennung autonomer Fahrtechnologien.

Tesla schätzt, dass die zentrale Recheneinheit autonomer Fahrzeuge eine Leistungsfähigkeit von mindestens 50 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde<sup>6</sup> haben muss, damit die Algorithmen reale Verkehrssituationen bewältigen können. (Tesla 2019).

### 3.2.4 Technologische Entwicklungsbedarfe

Tabelle 5: Entwicklungsbedarfe autonomer Fahrzeuge

|                           | Aspekte                                                            | Entwicklungsbedarfe                                         |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Hardware</b>           | Sensoren wie Radar, LiDAR und Kamerasysteme                        | <i>mittel bis hoch</i><br>Fehlerquoten, Leistung und Kosten |
|                           | Prozessoren/CPU                                                    | <i>mittel</i>                                               |
|                           | Internet-Konnektivität                                             | <i>niedrig</i>                                              |
|                           | Aktorik                                                            | <i>niedrig</i>                                              |
| <b>IT und Software</b>    | Software: Betriebssystem, maschinelles Lernen, Benutzeroberflächen | <i>hoch</i><br>Bewältigung komplexer Fahrumgebungen         |
|                           | Hochauflösende Straßenkarten                                       | <i>mittel</i><br>Erhöhung der Genauigkeiten                 |
| <b>System-integration</b> | Validierung und Erprobung                                          | <i>hoch</i>                                                 |
| <b>Montagearbeit</b>      | Fertigungsprozesse                                                 | <i>niedrig</i>                                              |

Quelle: eigene Tabelle, in Anlehnung an Mosquet et al. (2015, S. 12) und basierend auf Experteninterviews

Autonome Fahrzeuge sind noch nicht so weit ausgereift, um unter allen Verkehrsbedingungen zuverlässig fahren zu können. Das betrifft vor allem die Bestimmungsgenauigkeiten, Fehlerquotenoptimierung und Kostensenkung der Sensorik, die Softwareentwicklung und das maschinelle Lernen im Speziellen, sowie die Erprobung der Systeme in realen und simulierten Verkehrsumgebungen. Aber auch die Rechenleistungen der Prozessoren und die Kartografie der Straßenverkehrssysteme müssen weiter verbessert werden (siehe Tabelle 5).

<sup>6</sup> 50 TOPS (Trillion operations per second).

Die verbleibenden Entwicklungsbedarfe werden in den späteren Technologie-Roadmaps auf der Technologieebene berücksichtigt. Darüber hinaus müssen auch wichtige Fragen zur Anfälligkeit der Systeme gegenüber Hacking-Angriffen geklärt werden. Ebenso könnte es zu Missbräuchen durch andere Verkehrsteilnehmer kommen, die autonomen Fahrzeuge etwa keine Vorfahrt gewähren, wissentlich, dass diese automatisch bremsen und Unfälle zu vermeiden versuchen.

### 3.3 Die Car2X-Kommunikation

Die Digitalisierung schafft neue Möglichkeiten intelligenter Vernetzungen im Mobilitätssektor, durch die der Straßenverkehr sicherer, effizienter und komfortabler werden soll. Auch das autonome Fahren könnte davon maßgeblich profitieren. Manche Experten glauben, dass die Telematik – die Verknüpfung von Telekommunikation und Informatik – sogar eine wichtige Voraussetzung dafür ist (vgl. ABI Research 2017).

Zum einen können über die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander, die sogenannte „Car2Car-Kommunikation“ (Car-to-Car), Informationen über akute Gefahrensituationen wie Unfälle, Stauenden, Glatteis oder Baustellen innerhalb von Sekundenbruchteilen ausgetauscht werden. Zum anderen kann durch die Vernetzung von Fahrzeugen mit Ampeln, Verkehrsleitsystemen und anderen Infrastrukturen, die sogenannte „Car2I-Kommunikation“ (Car-to-Infrastructure), der Verkehrsfluss verbessert werden. Schätzungsweise ein Drittel des Stadtverkehrs, der durch die Parklatzsuche entsteht, und ein Fünftel aller Staus könnten entfallen, indem überfüllte Verkehrsbereiche automatisch umfahren und freie Parkplätze per Funk zugewiesen werden (VDA 2018c).

Die Car2Car- und Car2I-Kommunikationen werden unter dem Oberbegriff der „Car2X-Kommunikation“<sup>7</sup> zusammengefasst, deren Potenziale bereits erprobt werden: Seit 2018 können Fahrzeuge von Audi mit über 700 Ampeln in Berlin kommunizieren, so dass den Fahrern die optimale Fahrgeschwindigkeit für grüne Ampelschaltungen oder die verbleibende Zeit von Rotphasen angezeigt werden kann.

In Bochum testet das Unternehmen innogy SE digitale Straßenlaternen („Smart Poles“), mit denen unter anderen freie Parkplätze erkannt und effizientes Parkraummanagement möglich wird<sup>8</sup>. Einige Fahrzeugmodelle

---

7 Manchmal auch V2V- (Vehicle-to-Vehicle), V2I- (Vehicle-to-Infrastructure) und dementsprechend V2X-Kommunikationen (vgl. Mosquet et al. 2015).

8 <https://www.bochum.de/Pressemeldungen/November/Bochum-wird-smarter-Bochum-ist-Pilotstadt-fuer-intelligente-Strasseninfrastruktur----Smart-Poles->

von Mercedes-Benz sind untereinander und mit Servern vernetzt, um Informationen über gesperrte Verkehrsabschnitte oder Sichteinschränkungen auszutauschen (Urbach 2018; VDA 2018c, 2018b; ABI Research 2018). Auch Cadillac verbaut solche Kommunikationsschnittstellen in seinen Fahrzeugen, z. T. sogar serienmäßig, wie im Modell CTS Sedan (Cadillac 2017). In praxisnahen Feldversuchen werden auch die Möglichkeiten des „Platooning“ demonstriert, dem automatischen Folgefahren in Fahrzeugkolonnen (vgl. Volvo Group 2018; VDA 2018d; ADAC 2018b).

Die Car2X-Kommunikation kann über das Mobilfunknetz – manchmal auch über WLAN – oder die *DSRC* (*Dedicated Short Range Communication*) erfolgen. Zur Identifizierung der Fahrzeuge werden individuelle Client-Nummern ausgegeben. Immer häufiger scheinen die Hersteller das Mobilfunknetz zu bevorzugen (vgl. ABI Research 2017). Die DSRC sollte aber als Redundanzsystem fortbestehen, argumentiert Daugherty<sup>9</sup> (2017). Der Datenaustausch wäre nämlich auch dann gesichert, wenn der Mobilfunk ausfällt. Zudem ermöglicht die geringere Latenz der DSRC schnellere Warnmeldungen über Gefahren im unmittelbaren Fahrumfeld; mittels Mobilfunks kann der Verkehr großflächig überwacht werden.

Während die technische Ausstattung der Car2Car-Kommunikation sehr kostengünstig ist (siehe Abbildung 6), muss die verkehrstechnische Infrastruktur mit teuren Zusatzkomponenten ausgerüstet werden, um für die Car2I-Kommunikation geeignet zu sein. In einem Feldversuch von General Motors lagen die Kosten der Überwachung von nur zwei Verkehrskreuzungen bei knapp 20.000 USD (Charniga 2017). Im breiteren Kontext sind neben den Car2Car- und Car2I-Kommunikationen auch kooperative Mobilitätskonzepte in vernetzten Städten und IoT<sup>10</sup>-Synergien durch Car2H- (Car-to-Home) oder C2G-Kommunikationen (Car-to-Grid) denkbar (ABI Research 2017).

Wie bereits angedeutet, spielt das Mobilfunknetz eine wichtige Rolle in der Vernetzung des Mobilitätssektors. Die deutsche Bundesregierung verfolgt ein Innovationsprogramm zur Weiterentwicklung von 4G zu 5G, den neuen Standard für Mobilfunktelefonie und mobiles Internet, der bis 2022 entlang aller Autobahnen und bis 2024 auch entlang aller Bundesstraßen verfügbar sein soll (BMVI 2019). Durch den neuen Standard wird die Übertragungsgeschwindigkeit von maximal einem auf bis zu 20 Gigabit pro Sekunde gesteigert und die Latenz von 70 auf eine Millisekunde reduziert (Nordrum/Clark/IEEE Spectrum Staff 2017).

Viele Medienberichte betonen die Notwendigkeit von 5G für das autonome Fahren (vgl. Vieweg 2016; Kleber 2018), auch Warren und Dewar (2014, S. 9) argumentieren solchermassen. In unseren Experteninterviews

9 Leiter Technik der Motor and Equipment Manufacturers Association (MEMA).

10 IoT: Internet of Things.

wurden solche Einschätzungen aber entschieden kritisiert. Zwar könnten mittels 5G Rechenleistungen an hoch frequentierten Verkehrsabschnitten gebündelt werden, so dass auch größere Datenmengen in einer hochvernetzten Mobilität bewältigt werden können, für das autonome Fahren als solches reiche der bisherige Standard aber aus.

Vielmehr dürften Automobilhersteller und Fahrdienstleister ein Interesse an neuen Servicekonzepten haben, etwa in Form von Streamingdiensten oder Echtzeit-Computersimulationen, die erst durch das schnellere 5G ermöglicht werden. Das Marktvolumen solcher Zusatzleistungen liegt bei schätzungsweise mehreren Milliarden Euro (vgl. Dungs et al. 2016). Mittlerweile wird die vermeintliche Notwendigkeit von 5G für das autonome Fahren auch in der Presse relativiert. Stattdessen ist von einer möglichen Unterstützung die Rede (vgl. Richter 2019; Herrmann 2019).

### **3.4 Die zeitliche Realisierbarkeit des autonomen Fahrens**

Zum Ende dieses Kapitels wird die zeitliche Realisierbarkeit des automatisierten und autonomen Fahrens abgeschätzt, eine Frage, die bereits vielfach diskutiert wird. Frühe Einschätzungen gehen allgemein davon aus, dass mit dem autonomen Fahren noch in diesem Jahrzehnt zu rechnen ist. So sind autonome Fahrzeuge laut einer Studie von Ernst & Young noch vor 2030 im breiten Markt verfügbar (Ernst & Young 2013); das automatisierte Fahren könnte schon ab 2025 ein fester Bestandteil des Verkehrsalltags sein, so die Continental-Mobilitätsstudie von 2013.

Die Aral-Studie von 2015 prognostiziert eine Marktreife autonomer Fahrzeuge ab 2025 (Aral 2015) und laut Kyriakidis et al. (2015) fährt die Mehrheit der Verkehrsteilnehmer noch vor 2030 autonom – das eigenständige Fahren könnte ab 2045 sogar verboten sein. Einer Marktanalyse der Boston Consulting Group zufolge wird der Durchsetzungsgrad teilautonomer Fahrzeuge im Jahr 2035 bei 15 und der vollautonomer bei 9,8 Prozent liegen (Mosquet et al. 2015, S. 18). Das autonome Fahren wird aber schon ab 2030 im Stadtverkehr möglich sein, so eine grobe Einschätzung des Verbandes der Automobilindustrie (VDA 2018e).

Seit einiger Zeit werden aber auch Zweifel an einer schnellen Marktdurchsetzung autonomer Fahrzeuge laut. Nach einer Studie des Forschungsinstituts Prognos, die vom ADAC in Auftrag gegeben wurde, ist das autonome Fahren frühestens ab 2040 auf Landstraßen möglich. Danach erfolgen zwar schon ab 2050 40 Prozent aller Fahrleistungen auf Autobahnen autonom, auf Landstraßen, wo rund 60 Prozent der Ver-

kehrstoten verzeichnet werden, aber nur weniger als vier Prozent. Die Anzahl vollautonomer Fahrzeuge, die unter allen Verkehrsbedingungen selbständig fahren können, soll dann erst bei 2,1 Millionen liegen, was auch der hohen Abschreibungsdauer herkömmlicher Fahrzeuge geschuldet sein wird (Prognos 2018).

Thomas Sedran, Vorstandschef der Volkswagen Nutzfahrzeugsparte und Verantwortlicher für neue Mobilitätskonzepte des Unternehmens, glaubt, dass die bisherigen Prognosen zu optimistisch seien (Freitag 2019). John Krafcik, Geschäftsführer von Waymo, äußerte Bedenken, ob das autonome Fahren überhaupt jemals uneingeschränkt möglich sein wird (Krafcik 2018).

Dass der zuvor optimistische Blick immer häufiger auch in Zweifel umschlägt, passt in die wechselhafte Erwartungshaltung, die auch schon andere Innovationen erfahren haben. Jackie Fenn, eine Mitarbeiterin des Marktforschungsunternehmens Gartner, hat das Konzept des *Hype-Zyklus* (englisch: *Hype cycle*) entwickelt, das die Phasen der öffentlichen Aufmerksamkeit für neue Technologien von ihrer Entstehung bis zur Marktreife abbildet (vgl. Fenn 1995).

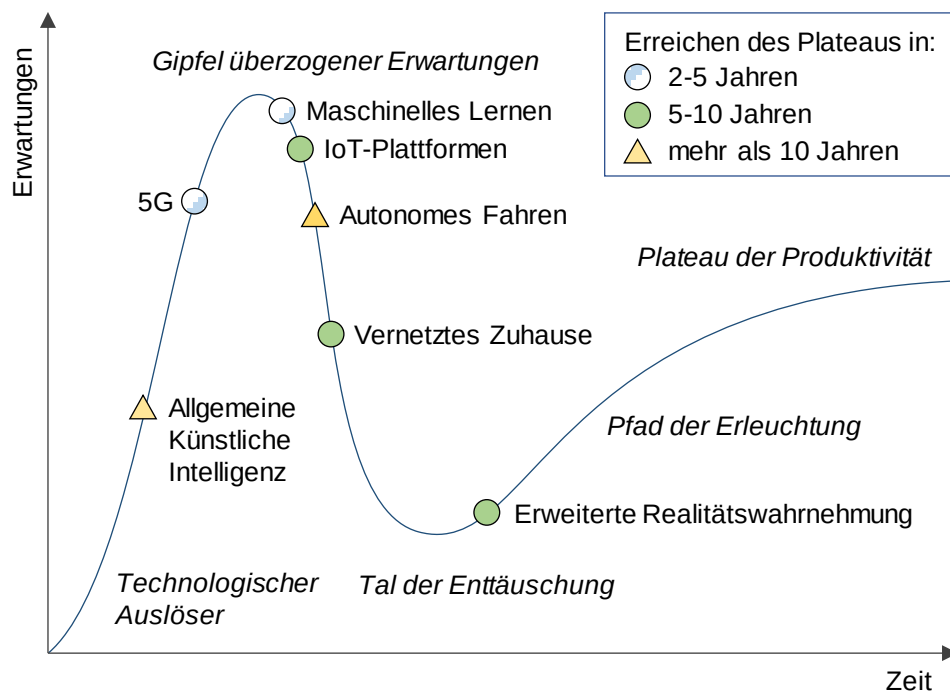
Abbildung 7 zeigt dessen grafischen Verlauf: Ein technologischer Durchbruch stößt zuallererst auf das Interesse des Fachpublikums (*technologischer Auslöser*). Interessieren sich danach auch weitere Gruppen für das Thema, nimmt die Aufmerksamkeit weiter zu. Weil die Potenziale einer neuen Technologie aber häufig überschätzt werden, wird nach einiger Zeit – im übertragenen Sinne – ein *Gipfel überzogener Erwartungen* erklommen. Sobald dann mögliche Probleme oder Einschränkungen publik werden, nimmt die Erwartungshaltung wieder ab, bis ein *Tal der Enttäuschung* erreicht wird.

Erst wenn die Vorteile der Technologie anerkannt und genutzt werden, nimmt die Aufmerksamkeit wieder zu und ein *Pfad der Erleuchtung* beginnt. Durch technologische Weiterentwicklungen bildet sich schließlich ein *Plateau der Produktivität*, dessen Höhe davon abhängt, ob die Technologie im Nischen- oder Massenmarkt genutzt wird<sup>11</sup>.

Die Zeitachse wird nicht genauer spezifiziert (siehe Abbildung 7), weil Technologien unterschiedlich lange brauchen, um den Hype-Zyklus zu durchlaufen. Stattdessen indiziert die beigefügte Legende die erwartete Dauer bis zum Erreichen des Plateaus. Einschätzungen dazu, an welchem Punkt des Hype-Zyklus sich eine Technologie zurzeit befindet und wann das Plateau der Produktivität erreicht wird, werden durch Expertenbefragungen und vergleichende Studien gebildet (Gartner 2018a).

<sup>11</sup> In Grafik 1 liegt das Plateau der Produktivität etwas höher als üblich (vgl. Gartner 2018b), weil autonome Fahrzeuge ein breites Marktpotenzial haben, so unsere Einschätzung.

Abbildung 7: Der Hype-Zyklus nach Gartner (2018a)



Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an Fenn (1995) und Gartner (2018a)

Der Hype-Zyklus zeigt nur einen sehr vereinfachten Verlauf öffentlicher Erwartungen an neue Technologien. Genauso kann seine lückenhafte Methodik kritisiert werden, weil quantitative Forschungsansätze zumeist ausgeklammert werden (vgl. Gartner 2018b).

Dessen ungeachtet hat das Konzept schon viele Entwicklungen vorhersagen oder im Nachhinein bestätigen können<sup>12</sup>. Gute Beispiele sind die plötzliche Überschätzung des Internets um die Jahrtausendwende – auch bekannt als „Dotcom-Blase“ – und dessen nunmehr konstante Weiterentwicklung; sogenannte „KI-Winter“, Phasen, in denen Forschungsinvestitionen in die Künstliche Intelligenz zurückgehen, weil zuvor geweckte Erwartungen nicht erfüllt werden;<sup>13</sup> oder die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung (englisch: *Augmented Reality*), deren Potenziale nach anfänglicher Euphorie und zwischenzeitlicher Enttäuschung erst langsam erkannt werden.

<sup>12</sup> Gartner entwickelt Hype-Zyklen für verschiedene Technologiebereiche (vgl. Gartner 2017; 2018b).

<sup>13</sup> Durch Unterkonzepte wie das maschinelle Lernen oder neuronale Netzwerke durchlebt die Künstliche Intelligenz genau genommen mehrere Zyklen. Solche Entwicklungen werden auch als „Phoenix-Innovationen“ bezeichnet (vgl. Gartner 2018a).



Wir glauben, basierend auf unseren Experteninterviews und den Literaturergebnissen, dass die Erwartungen an das autonome Fahren wieder zurückgehen (siehe Abbildung 7), was sich auch in aktuelleren Einschätzungen zu dessen zeitlichen Realisierbarkeit widerspiegelt (s. o.). Zum Vergleich sind in Abbildung 7 auch andere, zuvor schon erwähnte Technologien abgebildet.

Die Potenziale autonomer Fahrzeuge sollten dennoch nicht unterschätzt werden, schließlich folgt auf die Phase der Enttäuschung oftmals eine der Anerkennung. In den 1960er und 1970er Jahren soll der Zukunftsforscher Roy Amara dazu passend gesagt haben, dass die Auswirkungen einer neuen Technologie häufig kurzfristig überschätzt und langfristig unterschätzt werden – auch bekannt als „Amaras Gesetz“ (vgl. Ratcliffe 2016).

Der Weg ins *Tal der Enttäuschung*, auf dem sich das autonome Fahren zurzeit befindet, gilt als Gefahrenzone, weil der Blick für zukünftige Nutzungspotenziale schwindet. Doch hier entscheidet sich, wer später als Marktführer agiert, wenn es zur breiten Adaption kommt (vgl. Gartner 2018b). Gerade deshalb müssen sich die beteiligten Akteure schon heute mit den Implikationen des autonomen Fahrens beschäftigen.

Auch wir haben in unseren Experteninterviews nach der zeitlichen Realisierbarkeit des automatisierten und autonomen Fahrens gefragt. Wie schon in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, begründen heutige Assistenzsysteme eine Teilautomatisierung nach SAE-Level 2. Die bedingte Fahrzeugautomatisierung (SAE-Level 3) könnte ab 2025 erreicht sein, so die mehrheitliche Einschätzung der Experten.

Allerdings erfordere der darauffolgende Übergang zu SAE-Level 4 einen ungleich größeren technischen Hub. Zwar können schon heute viele Pilotfahrzeuge überwiegend autonom fahren (vgl. Audi 2014; BMW 2019; Swisscom 2015; Waymo 2019), aber nur wenn die äußeren Rahmenbedingungen dafür geeignet sind, das Wetter also angemessen ist und die verkehrstechnische Infrastruktur wie Straßenschilder oder Fahrbahnmarkierungen erkennbar sind.

Die SAE-Level 4 – und später 5 – sind aber erst dann erreicht, wenn Kraftfahrzeuge unter allen Straßen-, Verkehrs- und Wetterbedingungen selbständig fahren können – der verkehrliche Kontext also irrelevant ist. Wenn starke Regenschauer oder schneebedeckte Straßen einer Automation entgegenstehen, kann per Definition nicht vom alleingültigen, autonomen Fahren gesprochen werden.

Die Fahrzeughochautomatisierung (SAE-Level 4) ist deshalb erst in etwa ab 2040 bis 2050 zuverlässig möglich, so das durchschnittliche Ergebnis unserer Befragung. Dafür ist der letzte Schritt zur Fahrzeugvollau-

tomatisierung (SAE-Level 5) danach nur noch marginal, weil die technischen Herausforderungen ähnlich sind (siehe Abschnitt 3.2.1); das SAE-Level 5 könnte schon kurz darauf zwischen 2045 und 2055 erreicht sein. Im Umkehrschluss hätten die beteiligten Akteure also noch etwas Zeit, um sich auf die bevorstehenden Herausforderungen einzustellen.

In unseren Befragungen wurde aber auch das Innovationspotenzial neuer Anbieter wie Tesla oder Waymo betont, durch die das autonome Fahren schon deutlich früher erreicht werden könnte. So bietet Waymo schon heute teilautonome Fahrdienstleistungen an und Tesla möchte das vollautonome Fahren ab 2020 in privaten Fahrzeugen ermöglichen. Eine derart frühe Einführung wurde von einigen der befragten Experten bezweifelt und von anderen wiederum als sehr optimistisch, aber möglich eingeschätzt. Kommt es hingegen zu technischen Problemen, die sogar zu Unfällen führen, wären schärfere Rechtsvorschriften und eine Skepsis unter den Verbrauchern die Folge, so die mehrheitliche Meinung. Die weitere Einführung autonomer Fahrzeuge dürfte sich dann verzögern.

Unsere Befragungsergebnisse sind noch einmal in Abbildung 8 zusammengefasst. Die darin gezeigten Rechtecke (SAE-Level 3 bis 5) indizieren die Spannweiten der Experteneinschätzungen; vergangene und erwartete Markteinführungen einzelner Fahr- und Parkfunktionen, die mit den Automatisierungsleveln assoziiert werden, sind durch Rauten symbolisiert. Schon in wenigen Jahren könnten Autobahnpiloten oder das automatische Valet Parking<sup>14</sup> Serienreife erlangen, das hoch- und vollautomatisierte Fahren ist damit aber noch nicht erreicht (s. o.). Diese Unterscheidung bleibt häufig unberücksichtigt: einzelne Fahr- und Parkfunktionen werden bereits mit dem autonomen Fahren gleichgesetzt.

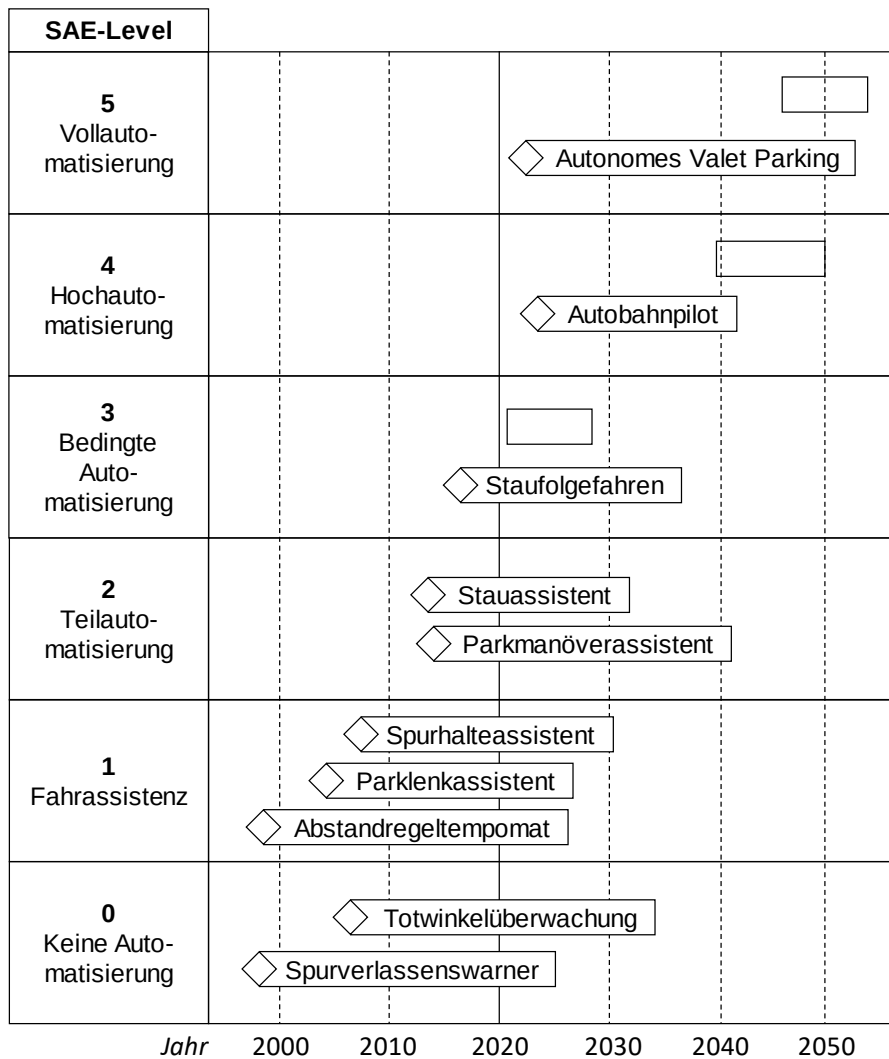
Die Einführung der SAE-Level 3 bis 5 dürfte – wie auch schon die der Level 1 und 2 (siehe Abschnitt 3.1) – schrittweise über die Entwicklung immer komplexerer Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsysteme erfolgen, die zuerst in den oberen Fahrzeugklassen angeboten werden. Erst nachdem Funktionen wie das automatische Staufolgefahren oder Autobahnpiloten ausreichend erprobt wurden, ist mit dem autonomen Fahren in der Stadt zu rechnen, wo die Fahrgeschwindigkeiten zwar geringer, die verkehrlichen Herausforderungen aber um ein Vielfaches komplexer sind.

Möglicherweise werden die Automatisierungslevel auch nicht in aufsteigender Reihenfolge eingeführt. So könnte das SAE-Level 5 aus technischer Sicht weniger anspruchsvoll als das SAE-Level 4 sein, weil bei Ersterem die Fahraufgaben eindeutig beim autonomen Fahrzeug liegen und dahingehende Missverständnisse ausgeräumt werden.

---

<sup>14</sup> Das autonome Valet Parking beschreibt das fahrerlose Parken hinter einer Übergabezone.

Abbildung 8: Bisherige und erwartete Markteinführungen der SAE-Automatisierungslevel



 Experteneinschätzungen zur Marktreife der SAE-Level 3 bis 5. Die Breiten der Rechtecke indizieren die Spannweiten der Befragungsergebnisse.

 Vergangene und erwartete Markteinführungen automatisierter und autonomer Fahr- und Parkfunktionen.

Quelle: eigene Abbildung, basierend auf Experteninterviews und eigenen Analysen. Die Einschätzungen zu den Fahr- und Parkfunktionen stammen aus VDA (2018b).

## 4. Wettbewerb um das autonome Autofahren

Viele Wirtschaftsbereiche stehen im Wandel. Neue Wachstumsmärkte, technologische Fortschritte, alternative Kundenbedürfnisse, strengere Umweltvorschriften und die Digitalisierung stellen das Gros der Anbieter vor neue Herausforderungen. In der Automobilbranche sind diese Einflüsse anhand vier großer, einander verstärkender Trends erkennbar: Das autonome Fahren, die Elektrifizierung, die Konnektivität sowie Konzepte diverser Mobilität<sup>15</sup> (Mohr et al. 2016, S. 3). Verbrennungsmotoren und klassische Formen des Individualverkehrs erscheinen hingegen veraltet.

Das Auto der Zukunft ist nicht mehr nur ein Fortbewegungsmittel, sondern Zentrale intelligenter Mobilitäts-, Service- und Unterhaltungsdienstleistungen. Weil immer neuere Anbieter in den Markt treten und der Wunsch nach flexibler und geteilter Mobilität steigt (vgl. Stricker/Kalmbach/Zayer 2018, S. 3–4), gerät das Selbstverständnis traditioneller Automobilhersteller und -zulieferer in Gefahr.

Manchmal wird sogar vom Untergang etablierter Akteure gesprochen (vgl. Ulrich 2019; Schwarz 2019), die aber gleichermaßen vom Mobilitätswachstum und neuen Geschäftsmodellen profitieren könnten – weg von klassischen Fahrzeugverkäufen, hin zu neuen Dienstleistungskonzepten, die kontinuierliche Kundenbindungen schaffen (Mohr et al. 2016, S. 3). Mit anderen Worten: Die Automobilbranche, eine deutsche Leitindustrie, steht am Scheideweg und das autonome Fahren spielt dabei eine wesentliche Rolle.

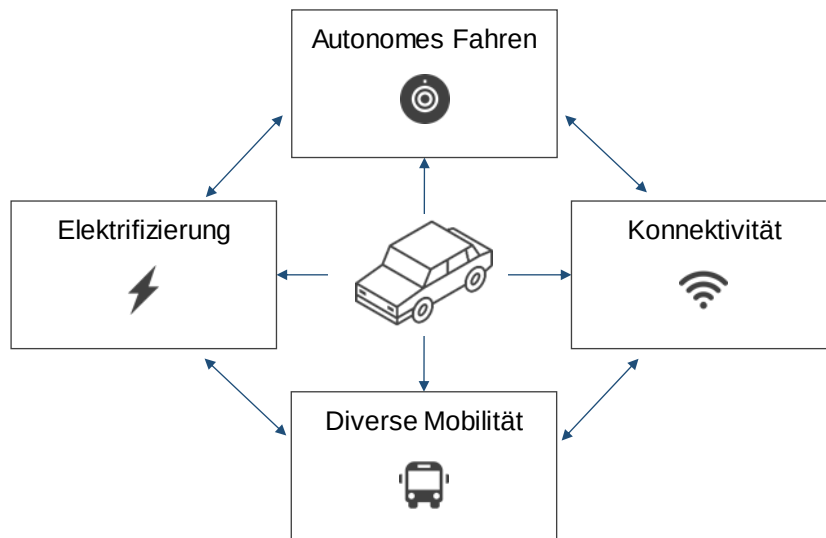
Im dritten Kapitel dieser Studie werden die Chancen und Herausforderungen deutscher Automobilhersteller und -zulieferer im Wettbewerb mit Technologieunternehmen und Mobilitätsanbietern beim autonomen Fahren untersucht. Dafür wird zunächst die Entstehung neuer Mobilitätsformen beschrieben, um für einen bevorstehenden Wandel im Privatbesitz von Kraftfahrzeugen zu argumentieren. In diesem Zusammenhang wird auch die Bedeutung der Automobilindustrie für die deutsche Wirtschaft reflektiert. Anschließend wird der Wettbewerb um die Entwicklung und Bereitstellung autonomer Fahrzeuge motiviert und anhand verschiedener Indikatoren diskutiert.

Die Auswirkungen der Digitalisierung und Automatisierung von Kraftfahrzeugen sind weit weniger untersucht als die der Elektrifizierung (z. B. Heymann/Koppel/Puls 2013), obwohl deren disruptives Potenzial deutlich größer sein könnte.

---

<sup>15</sup> Diverse Mobilität meint hier die Verknüpfung unterschiedlicher Verkehrsträger und Mobilitätsformen.

Abbildung 9: Automobile Trends der Zukunft



Quelle: eigene Abbildung

## 4.1 Neue Formen der Automobilität

Schon immer war die menschliche Mobilität an das Aufkommen neuer Verkehrsmittel und deren Nutzungsformen geknüpft: Kutschen, Dampfschiffe, Eisenbahnen, Automobile und Flugzeuge haben das Verständnis von Mobilität nacheinander revolutioniert (vgl. Schade/Kühn 2012, 17); die städtische Infrastruktur, der Warenverkehr und das soziale Miteinander wurden immer wieder neu definiert. Aus heutiger Sicht entstehen neue Formen der Mobilität auf drei verschiedene Weisen:

- *Neue Fahrzeugarten*, wie elektrische Fahrräder (E-Bikes oder Pedelecs), Stehroller (Segways oder Winglets), Scooter (E-Roller) oder Zweisitzer (z. B. Renault Twizy oder Hiriko);
- *neue Formen der Fahrzeugnutzung*, die mit den Begriffen „Nutzen statt besitzen“ und „Teilen“ überschrieben sind;
- und *(digitale) Vernetzungen verschiedener Verkehrsmittel* (Autos, Busse, Fahrräder, etc.) zur Schaffung flexibler, multimodaler Mobilitätskonzepte<sup>16</sup> (Schade und Kühn 2012, S. 17).

Die Automobilität als solche könnte sich vor allem durch neue Formen der Kraftfahrzeugnutzung grundlegend wandeln. „Nutzen statt besitzen“

<sup>16</sup> Gemeint sind Systeme bedarfsgerechter, effizienter und umweltfreundlicher Mobilität, die auf unterschiedliche Verkehrsträger gestützt sind.

meint Modelle, bei denen das Eigentum eines Fahrzeugs nicht mehr beim Fahrzeugnutzer, sondern einem Dienstleistungsunternehmen liegt, das auch sämtliche Aufgaben der Fahrzeuginstandhaltung übernimmt. „Teilen“ impliziert die Koordination einzelner Wegstrecken unter mehreren Nutzern, so dass die Fahrtkosten – seltener auch die Versicherungs- und Instandhaltungskosten – untereinander aufgeteilt werden können (Schade/Kühn 2012, S. 17).

Neue Formen der Kraftfahrzeugnutzung erfreuen sich wachsender Beliebtheit. Die bekanntesten Modelle werden nachstehend erläutert<sup>17</sup>:

- *Stationsbasiertes Carsharing*: Als „stationsbasiertes Carsharing“ – manchmal auch „klassisches Carsharing“ (Schade/Kühn 2012, S. 17) – wird die geteilte Nutzung von Kraftfahrzeugen bezeichnet, die einer größeren Anzahl von Nutzern per Rahmenvertrag zur Verfügung stehen (vgl. CsgG<sup>18</sup>). In einigen deutschen Städten ist das Modell seit über zwei Jahrzehnten verfügbar, gewann aber erst durch digitale Plattformen an größerer Bedeutung. Gegen eine geringe, zumeist monatliche Grundgebühr kann aus verschiedenen Fahrzeugen gewählt werden, die nach vorheriger Reservierung an festen Stationen abgeholt und wieder abgestellt werden müssen. Für die Nutzung werden der Grundgebühr Kilometer- und Zeitkosten hinzuaddiert. Der entscheidende Vorteil des stationsbasierten Carsharings liegt in der großen Auswahl verschiedener Fahrzeugtypen, dem die Pflichten zur Reservierung sowie Abholung und Rückgabe an bestimmten Stationen als Nachteile gegenüberstehen (Schade/Kühn 2012, S. 17–18).
- *Free-floating Carsharing*: Seit einigen Jahren erweitert das „Free-floating Carsharing“ (vgl. Bundesverband Carsharing 2019a) – manchmal auch „flexibles“ (vgl. Schade/Kühn 2012, S. 18) oder „stationsunabhängiges Carsharing“ (vgl. CsgG) – die klassische Form um die Spontannutzung ohne vorherige Reservierung. Verfügbare Fahrzeuge können über das Smartphone innerhalb eines bestimmten Geschäftsbereichs geortet und angemietet werden. Für die Nutzung werden zumeist minutengenaue Zeitkosten berechnet. Die Vorteile des Free-floating Carsharings liegen in eben dieser Spontannutzung sowie freien, stationsunabhängigen Anmietung und Rückgabe innerhalb des Geschäftsbereichs – nachteilig ist das auf wenige, vorwiegend kleine Fahrzeugtypen begrenzte Fahrzeugangebot. Damit dürfte das Free-floating Carsharing eher in Konkurrenz zum öffentlichen Personenverkehr oder Fahrradfahren stehen, während die stationsbasierte Variante

<sup>17</sup> Auch das Teilen nichtautomobiler Fahrzeuge wie E-Scooter, Stehroller und Fahrräder sowie der öffentliche Personenverkehr beeinflussen die Automobilität.

<sup>18</sup> Laut Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharings (Carsharinggesetz - CsgG).

eine Alternative zum eigenen Auto darstellt (Schade/Kühn 2012, S. 18).

- *Mitfahrgelegenheiten (in Echtzeit)*: Die Bereitstellung freier Plätze im eigenen Fahrzeug<sup>19</sup> ist aus Sicht anderer eine Mitfahrgelegenheit. Wie auch das klassische Carsharing ist das Modell seit über zwei Jahrzehnten in organisierter Form verbreitet, wurde aber erst durch digitale Plattformen attraktiver: heutzutage können freie Plätze sogar spontan und in Echtzeit vermittelt werden. Im Gegensatz zum Carsharing fallen Eigentum und Nutzung eines Fahrzeugs normalerweise zusammen, es sind aber auch kommerzielle Anbieter wie DeinBus<sup>20</sup> im Markt vertreten. (Schade/Kühn 2012, S. 18)

#### 4.1.1 Der private Autobesitz im Wandel

Bisher wird für gewöhnlich ein bestimmter Kraftfahrzeugtyp für sämtliche automobile Mobilitätszwecke genutzt – von beruflichen Pendelstrecken bis hin Einkaufsfahrten. Die prozentualen Verkehrsleistungen unterschiedlicher Wegezwecke, die mit dem eigenen Auto erbracht werden, sind weiter unten in Abbildung 10 aufgeführt (linker Kasten). Wenn jedoch durch das Carsharing ein zum jeweiligen Wegezweck passendes Kraftfahrzeug auf Abruf – etwa über das Smartphone – bereitsteht, könnte das eigene Auto in Zukunft an Attraktivität verlieren (rechter Kasten). Schon heute sind die ersten Trends (engl.: *weak signals*) dafür erkennbar (Schade/Kühn 2012, S. 18).

Insbesondere Menschen, die in Ballungsräumen leben, stehen alternativen Mobilitätsformen offen gegenüber und stellen das eigene Auto immer häufiger in Frage. Laut Stricker et al. (2018, 10) wären bis zu 34 Prozent der Autofahrer in Berlin, München, Wien und Rhein-Ruhr bei längeren Staus sowie Fahr- und Parkverboten bereit, auf andere Mobilitätsformen umzusteigen. De facto ist deren Nutzung zwischen 2013 und 2018 fast um das Zweieinhalbfache gestiegen. Der Anteil derer, für die das eigene Auto ein Statussymbol darstellt, ist derweil von 36 auf 29 Prozent gesunken, mit deutlichen Unterschieden zwischen den Städten: Während der Anteil in München noch bei 33 Prozent liegt, ist er in Wien auf nunmehr 25 Prozent gefallen (Stricker/Kalmbach/Zayer 2018, S. 3–4).

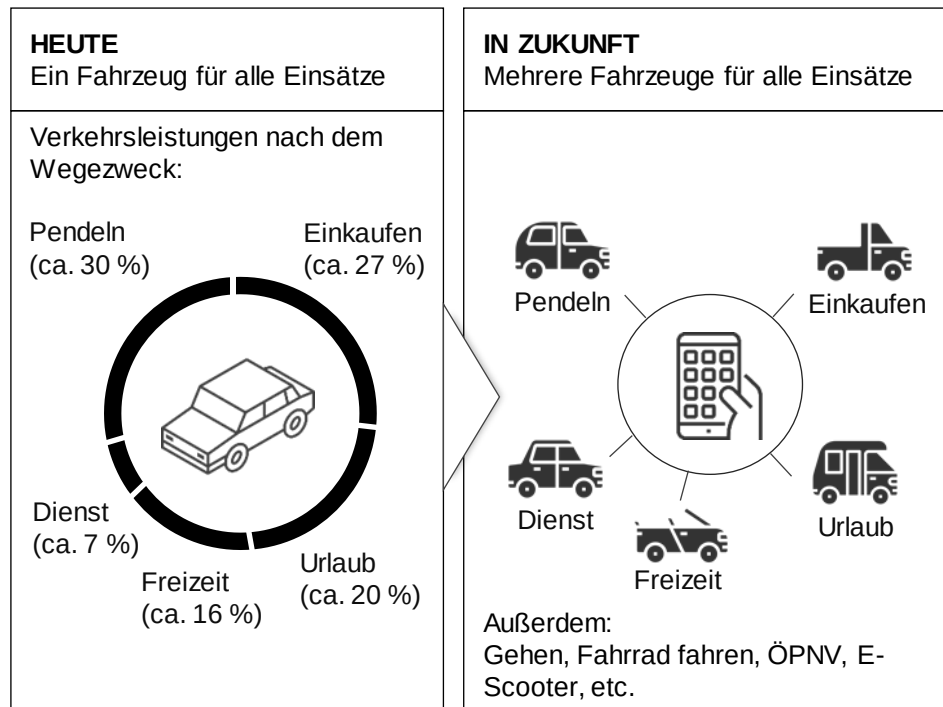
Unterdessen ist die Zahl der Carsharing-Nutzer in Deutschland zwischen 2015 und 2019 von 0,57 auf 1,08 Millionen gestiegen (Pawlik 2019) – ein Zuwachs von fast 90 Prozent – und die Anzahl registrierter

<sup>19</sup> Seltener auch bei Bahn- und Busreisen.

<sup>20</sup> Das Fernbusunternehmen DeinBus organisiert Busfahrten im Auftrag von Gruppen Teilender (vgl. DeinBus 2019).

Nutzer von 1,04 auf 2,46 Millionen (Ahlsvede 2019a) – eine Steigerung von 237 Prozent<sup>21</sup>. Tatsächlich hätten sogar 9,29 Millionen Menschen Interesse am Carsharing (Pawlik 2019). Das Free-floating-Carsharing wird bereits deutlich besser angenommen als die klassische Form (vgl. Bundesverband Carsharing 2019b).

Abbildung 10: Das automobile Nutzungsverhalten im Wandel



Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an Mohr et al. (2016, S. 8)

Schon 2030 könnte jeder zehnte Neuwagen für geteilte Mobilitätskonzepte genutzt werden, die damit sogar 30 Prozent aller Fahrleistungen mit Neuwagen erbrächten; 2050 könnte jeder dritte Neuwagen ein geteilter sein (Mohr et al. 2016, S. 8). Hiernach würde auch der Bedarf an Park- und Stellflächen sinken, so dass Raum für alternative Flächennutzungskonzepte entstünde. Allein in München könnte so eine Fläche von schätzungsweise 1.200 Fußballfeldern frei werden (vgl. Hasse et al. 2017, S. 26), was politische Anreizgestaltungen für die geteilte Nutzung von Autos nahelegt.

<sup>21</sup> Die Diskrepanz zwischen tatsächlichen und registrierten Nutzern erklärt sich durch Mehrfachanmeldungen bei unterschiedlichen Anbietern.



Jüngst wurde in einem Gutachten des Umweltbundesamtes dafür argumentiert, finanzielle Privilegien für das (eigene) Auto im Sinne des Klimaschutzes zu kürzen (vgl. Hendzlik et al. 2019). Andererseits beschloss der Vermittlungsausschuss von Bund und Ländern im Rahmen des Klimapaketes der Bundesregierung, als Kompensation für einen CO<sub>2</sub>-Preis die Pendlerpauschale zu erhöhen. Die politischen Empfehlungen und Maßnahmen sind also bisher noch durchaus gegenläufig.

#### **4.1.2 Neue Automobilität durch das autonome Fahren**

Vieles spricht für das autonome Fahren, sowohl in privater als auch geteilter Form. Menschliche Fahrfehler werden als Unfallursache eliminiert, weil die technischen Assistenzsysteme den Verkehr besser überblicken, aggressive Fahrweisen ausschließen und Gefahrensituationen mittels Car2X-Kommunikation (siehe Abschnitt 3.3) antizipieren können.

Darüber hinaus wird das Stauaufkommen reduziert, weil die Fahrgeschwindigkeit optimal an die Verkehrslage angepasst und ineffizientes Brems- sowie Beschleunigungsverhalten vermieden werden. Mit einer Verbesserung des Verkehrsflusses gehen auch implizite Zeitersparnisse einher. Weil günstigere Parkflächen außerhalb des Stadtzentrums automatisch angefahren werden können, würden auch die Parkkosten sinken.

In einer früheren Studie haben wir die gesamtwirtschaftlichen Kosteneinsparpotenziale des automatisierten Fahrens in Deutschland bei mittlerer Marktdurchsetzung auf 24,9 Mrd. Euro pro Jahr geschätzt (vgl. Roos/Siegmann 2018). Darin sind die Potenziale positiver Gesundheitseffekte durch entspannteres Reisen noch gar nicht inbegriffen, ebenso wenig die des Klimaschutzes durch effizientere Fahrweisen. Auch in der Logistikbranche werden große Veränderungen durch autonome Lastkraftwagen erwartet (vgl. Kesse et al. 2016).

Das Interesse an der alltäglichen Nutzung automatisierter Fahrfunktionen liegt laut Bernhart et al. (2016, 10) in Deutschland und den USA bei jeweils 58 und in China sogar bei 96 Prozent der Kraftfahrzeugbesitzer. In einer weiteren Befragungsstudie wurden die Attribute „höhere Fahrtsicherheit“, „geringere Versicherungskosten“ und „andere Beschäftigungen während der Fahrt“ als häufigste Gründe für den zukünftigen Kauf vollautonomer Fahrzeuge genannt (Mosquet et al. 2015, S. 11).

Auch die Bereitschaft zur Nutzung alternativer Mobilitätsformen könnte durch das autonome Fahren deutlich zunehmen. Autonome Fahrzeuge schaffen völlig neue Möglichkeiten der geteilten Kraftfahrzeugnutzung, weil nicht nur Beförderungsfahrten als solche, sondern auch Wegstrecken zwischen verschiedenen Nutzern autonom erbracht werden könnten. In

Literatur und Presse wird von sogenannten „Robo-Taxis“ – Kurzform von Roboter-Taxis – gesprochen (vgl. Vosooghi et al. 2019; Eisert 2019), die im Vergleich zum Carsharing und zu Mitfahrgelegenheiten (s. o.) noch umfassendere Modelle der geteilten Mobilität ermöglichen:

- *Autonomes Ride-Hailing*: Unter „Ride-Hailing“ werden allgemein Dienstleistungen der Personenbeförderung verstanden, die einer Taxifahrt im deutschsprachigen Sinne gleichen. Insofern meint das „autonome Ride-Hailing“ Personenbeförderungen mit autonomen Fahrzeugen, die den Nutzer selbstfahrend – etwa nach der Buchung per App – abholen und zum gewünschten Zielort befördern. Die anschließende Parkplatzsuche entfällt, ebenso die Reallokationsproblematik des normalen Carsharings, weil die Fahrzeuge selbständig zum nächsten Nutzer fahren (vgl. Pham et al. 2017). Dank der Automation sind andere Beschäftigungen wie das Arbeiten, Schreiben, Lesen oder der Konsum von Unterhaltungsmedien, die über das Radiohören hinausgehen, während der Fahrt möglich. Laut einer Studie von Burns et al. (2012) würde eine Flotte von 9.000 Robo-Taxis ausreichen, um jedes konventionelle Taxi in New York City – eine Stadt mit über achteinhalb Millionen Einwohnern – zu ersetzen. Die durchschnittliche Wartezeit auf ein verfügbares Fahrzeug läge bei nur 36 Sekunden und die Kosten je gefahrene Meile bei 50 US-Cent (Burns/Jordan/Scarborough 2012). Am Beispiel New York City wären Beförderungsfahrten somit 35 Prozent günstiger als mit konventioneller Taxis (Mosquet et al. 2018, S. 21), vorrangig durch die Einsparung der unmittelbaren Personalkosten. Eine solche „Transportation Cloud“ könnte das eigene Auto für viele Menschen überflüssig machen, auch weil die Versicherungs- und Instandhaltungskosten mit einer noch größeren Anzahl von Nutzern geteilt würden und somit weitere finanzielle Vorteile möglich sind.
- *Autonomes Ride-Pooling*: Beim „Ride-Pooling“ – einer erweiterten Form des Ride-Hailing – werden die Fahrten verschiedener Nutzer zusammengelegt, so dass die Fahrgäste an flexiblen Haltepunkten zu- oder aussteigen können. Damit kann das Modell als Hybrid aus Taxi und öffentlichen Personenverkehr verstanden werden. Dementsprechend meint das „autonome Ride-Pooling“ den Einsatz selbstfahrender Kleinbusse, die statt fester Routen den effizientesten Weg zwischen verschiedenen Nutzern und Zielpunkten befahren (vgl. Samaranyake et al. 2017). Wie auch beim Carsharing und autonomen Ride-Hailing gelten die Vorteile geteilter Versicherungs- und Instandhaltungskosten; hinzu kommen die geringeren Fahrtkosten pro Fahrgast. Ab einem Besetzungsgrad von schätzungsweise zwei Personen könnte das Modell sogar zum öffentlichen Personenverkehr konkurrenzfähig sein (Mosquet et al. 2015, S. 21).

Auch wenn das eigene Auto für manche Verbraucher seinen Stellenwert behalten wird, könnten die klassischen Geschäftsmodelle des privaten Autokaufs und -leasings durch solche auf Abruf bereitstehenden Fahrdienstleistungen teilweise verdrängt werden. Im städtischen Raum ist das Potenzial besonders groß und es wird erwartet, dass in Zukunft ein größerer Teil der Weltbevölkerung in Städten leben wird (vgl. Mohr et al. 2016, S. 9–10).

Autonome Autos werde man nicht kaufen, sondern abonnieren, argumentieren auch Saffo (2014) sowie Mosquet et al. (2015). Schon heute würden 28 Prozent der Verbraucher in Deutschland und 26 Prozent in den USA die Nutzung von Robo-Taxis dem Neukauf eines privaten Fahrzeugs vorziehen (Bernhart et al. 2016, 12), obwohl diese bisher nur sehr vereinzelt verfügbar sind. Liegen deren Fahrkosten unter denen des eigenen Autos, sind es sogar 47 bzw. 35 Prozent. In den Niederlanden ist die Bereitschaft mit 59 Prozent noch größer (vgl. Berret et al. 2017, S. 11). Sind autonome Fahrdienstleistungen flächendeckend verfügbar, könnte das Nutzungspotenzial auch überproportional zunehmen.

Der etablierten Autoindustrie stünde damit ein völlig neuer Wettbewerb bevor, der in den nachfolgenden Abschnitten genauer untersucht werden soll. Zuvor wird die wirtschaftliche Bedeutung der deutschen Autoindustrie kurz reflektiert.

## 4.2 Die Bedeutung der Autoindustrie

In der Entwicklung konventioneller Kraftfahrzeuge gelten die deutschen Automobilhersteller als weltweit führend, insbesondere im Premiumsegment<sup>22</sup>. Deutschland – das Geburtsland des Automobils – hat einen Anteil von 71,7 Prozent am Weltmarkt für Premiumfahrzeuge, mit deutlichem Abstand vor Japan mit 11,3 Prozent, Großbritannien mit 5,9 Prozent, Schweden mit 5,8 Prozent, den USA mit 4,7 Prozent und Italien mit nur 0,3 Prozent (Dudenhöffer 2014a).

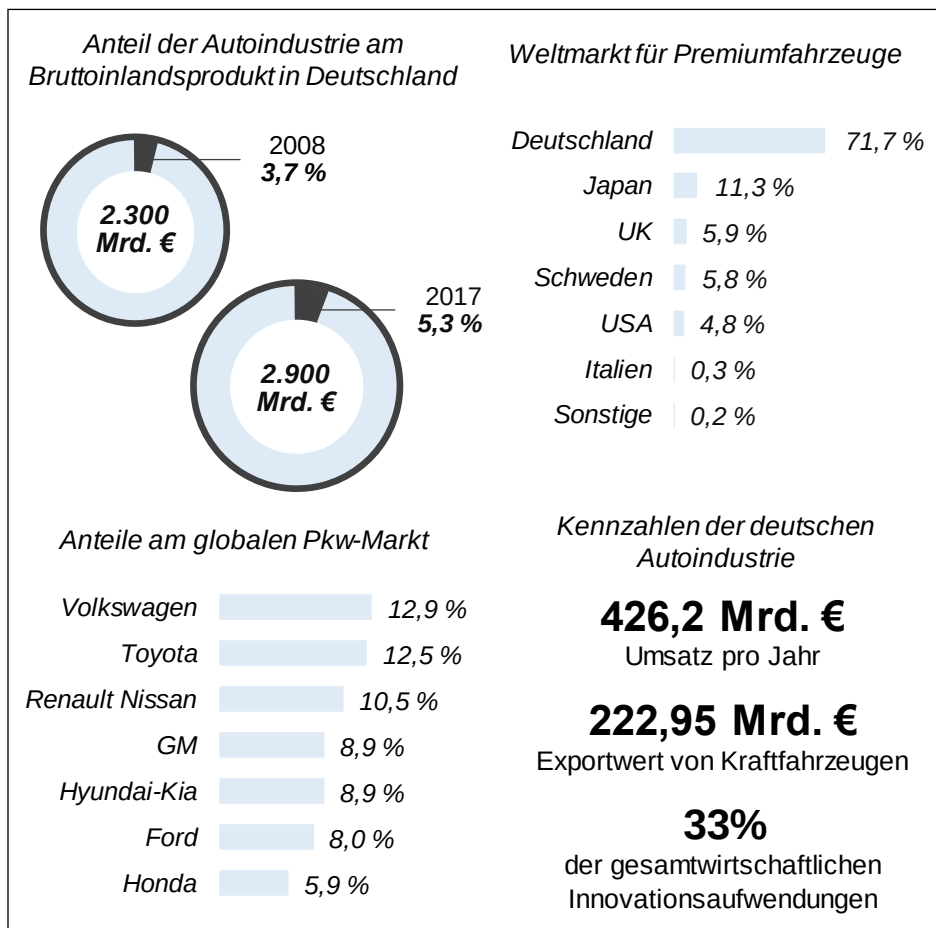
Audi, BMW, Mercedes und Porsche haben sich einen technischen Vorsprung erarbeitet, der kaum einholbar scheint. Zusammen mit Volkswagen, das mit einem Anteil von 12,9 Prozent an der Spitze des globalen Pkw-Marktes rangiert (Focus2Move 2019), Opel und den zahlreichen Zulieferunternehmen wie Bosch, Continental, ZF Friedrichshafen oder Hella tragen diese Unternehmen maßgeblich zur deutschen Wirtschaftsleistung bei.

---

<sup>22</sup> Der Premiumbegriff ist nicht eindeutig definiert. Nach Dudenhöffer (2014, 200) haben Premiumfahrzeuge einen 20-prozentigen Preisaufschlag im Vergleich zu Volumenmodellen.

800.000 Menschen sind hierzulande unmittelbar in der Autobranche beschäftigt, viele weitere indirekt. Der Jahresumsatz lag zuletzt bei 426 Mrd. Euro (Ahlsweide 2019b). 2014 wurden 46 Prozent davon mit Produktinnovationen erzielt, der Höchstwert im Vergleich aller Branchen (Bardt 2016, 39). Somit wurden im selben Jahr 33 Prozent der gesamtwirtschaftlichen Innovationsaufwendungen im Fahrzeugbau getätigt (vgl. ZEW 2016). Der Exportwert deutscher Kraftfahrzeuge beträgt 223 Mrd. Euro pro Jahr (Ahlsweide 2019b) und die gesamtwirtschaftliche Bedeutung nimmt weiter zu: Zwischen 2008 und 2017 ist der Anteil der Automobilindustrie am Bruttoinlandsprodukt von 3,7 auf 5,3 Prozent gestiegen (vgl. Ahlsweide 2019c).

Abbildung 11: Zahlen zur Autoindustrie



Quelle: eigene Abbildung, Daten aus Ahlsweide (2019b, 2019c), Dudenhöffer (2014), ZEW (2016) und Focus2Move (2019)

## 4.3 Neuer Wettbewerb in der Autoindustrie

Die Entwicklung und Bereitstellung autonomer Kraftfahrzeuge birgt große Geschäftspotenziale, erfordert aber Kompetenzen, die über das Kerngeschäft traditioneller Automobilhersteller hinausgehen. Zuerst steigt der Anteil der Informations- und Datenverarbeitung (vgl. Abschnitt 3.2.3). Zudem lassen Befragungsstudien vermuten, dass vermehrt andere Fahrzeugattribute gefragt sein werden (vgl. Mosquet et al. 2015): Komfort, Langlebigkeit und Robustheit – insbesondere beim Carsharing – statt Motorleistung und Fahrdynamik, also jene Attribute, mit denen deutsche Hersteller lange Zeit überzeugen konnten.

Sitzen keine menschlichen Fahrer mehr am Steuer, sind ebenso innovative Fahrzeuginnenraumkonzepte, die auf das Arbeiten, Lesen, Schreiben, Schlafen oder den Konsum von Unterhaltungsmedien während der Fahrt ausgerichtet sind, wahrscheinlich. Solche Veränderungen führen zu einer völlig neuen Wettbewerbssituation, weil sich bisherige Entwicklungsvorsprünge egalalisieren und die Markteintrittsbarrieren für neue Anbieter schwinden.

Welche Konsequenzen das haben kann, zeigt ein Blick auf die Elektromobilität: In China, dem weltweit stärksten Wachstumsmarkt, liegt der Marktanteil deutscher Hersteller an konventionellen Kraftfahrzeugen noch bei 23,2 Prozent, im Markt für Elektroautos hingegen nur bei 0,4 Prozent. Längst haben sich andere Hersteller im Markt positioniert und Marktanteile gesichert.

Wichtige Absatzmärkte drohen so verloren zu gehen, wie das Beispiel weiter verdeutlicht: Bis 2025 sollen in Peking 25 Prozent aller Neuwagen voll- oder zumindest teilelektrisch sein, ab 2030 wird der Verkauf von Autos mit Verbrennungsmotoren ganz gestoppt. 25 Prozent des chinesischen Neuwagenmarktes entsprechen den kombinierten Absätzen aller Neuwagen in Deutschland, Frankreich und Großbritannien (vgl. DW 2019).

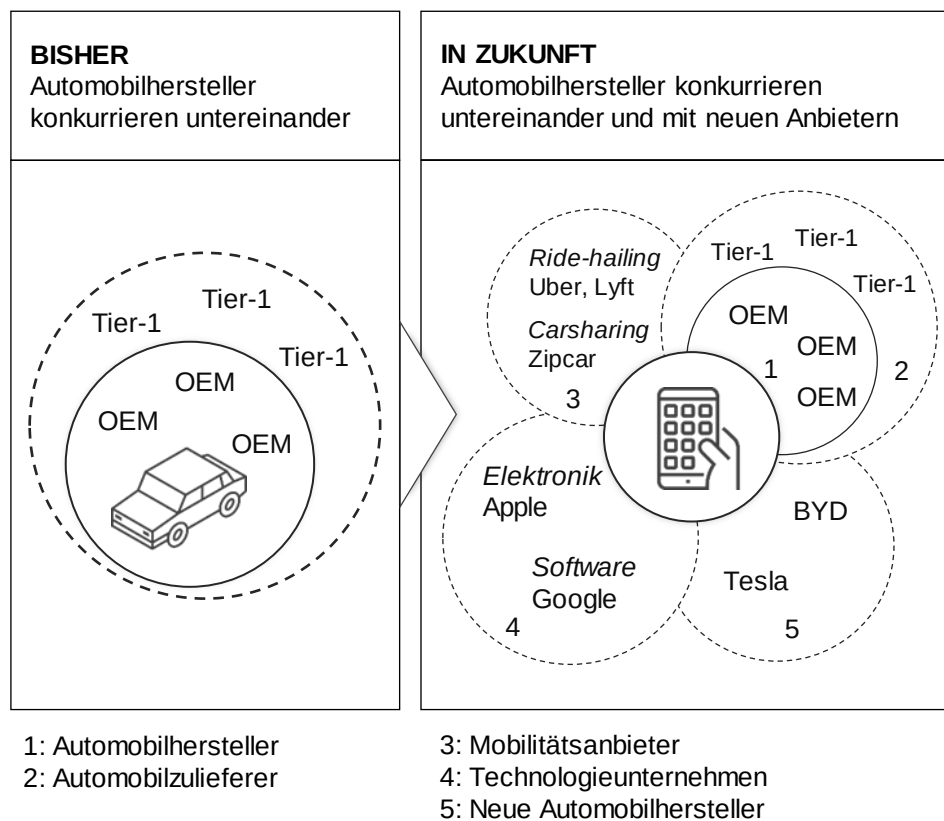
Die Exporte der deutschen Autobranche sind zwischen 2011 und heute bereits deutlich schwächer gewachsen als die der deutschen Gesamtwirtschaft (vgl. DeStatis 2019; Ahlswede 2019d). Schon wegen der Elektromobilität sollen hierzulande bis 2030 234.000 Stellen wegfallen und nur 109.000 neue hinzukommen, so eine bisher unveröffentlichte Studie des *Center for Automotive Research* der Universität Duisburg-Essen (vgl. Dams/Exner/Vetter 2019).

Beim autonomen Fahren droht eine ähnliche Entwicklung. Das betrifft nicht nur den Verkauf autonomer Fahrzeuge, sondern auch deren Bereit-

stellung in Form autonomer Fahrdienstleistungen oder sogenannte Mehrwertdienste während der Fahrt. Allein bei Letzteren sprechen Dungs et al. (2016) von milliardenschweren Umsatzpotenzialen.

Der Markt für Automobilität öffnet sich in viele Richtungen, weil gleich drei Arten neuer Anbieter wegen der neuen Geschäftspotenziale hinzukommen: Technologieunternehmen wie Google oder Apple, die eine herausragende Expertise in der Informations- und Datenverarbeitung haben und bereits zum autonomen Fahren forschen (vgl. Waymo 2019; Lee 2018); Mobilitätsanbieter wie UBER, Lyft oder Zipcar, die sich auf die Bereitstellung autonomer Fahrdienstleistungen spezialisieren und in einigen Städten bereits autonome Ride-Hailing-Dienste anbieten (Uber 2019; Lyft 2019; Zipcar 2019); und neue Hersteller wie Tesla oder BYD, die eine schnelle Einführung autonomer Fahrzeuge forcieren.

Abbildung 12: Zunehmende Komplexität in der Automobilindustrie



Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an Mohr et al. (2016, S. 13)

Während die klassischen Automobilhersteller also bisher nur untereinander konkurrierten und im engen wirtschaftlichen Austausch mit der Zulieferindustrie standen, gewinnt der Markt für Automobilität nun deutlich an

Komplexität. Abbildung 12 stellt diese Entwicklung grafisch dar. Die darin stehende Bezeichnung „OEM“ steht für *Original Equipment Manufacturer* (deutsch: *Originalausrüstungshersteller*) und meint die traditionellen Automobilhersteller – „Tier-1“ die Modul- oder Systemlieferanten, also die unmittelbaren Zuliefererunternehmen<sup>23</sup>.

Wie auch bei der Elektromobilität wird es beim autonomen Fahren darauf ankommen, wie sich die Bereitschaft zur Nutzung der neuen Technologien entwickelt und ob die deutsche Automobilindustrie, aber auch der Wirtschaftsstandort Deutschland im Allgemeinen es schaffen werden, diese Technologieentwicklung mit zu gestalten. Die deutsche Volkswirtschaft ist auf Hochtechnologien spezialisiert und deshalb auf Premi-umbranchen wie die der Automobilindustrie angewiesen, um seine im internationalen Vergleich höher bezahlten Arbeitsplätze sichern zu können. Hinsichtlich der Automobilindustrie droht diese wirtschaftliche Stellung verloren zu gehen (Dudenhöffer 2014, S. 26).

Es gibt bereits einige Studien, die den technologischen Reifegrad des autonomen Fahrens in Deutschland und anderen Ländern untersuchen (vgl. Will et al. 2017; Gandia et al. 2018; Dumitrescu et al. 2018). Darin wird Deutschland – neben den USA, China, Japan und Südkorea – zur Spitzengruppe gezählt. Vielfach basieren die Einschätzungen auf der Auswertung von Patentdatenbanken, in denen nach bestimmten Stichworten wie „autonomes Fahren“, „Fahrzeugautomation“ oder „automatisierte Assistenzsysteme“ gesucht wird. Allerdings werden dabei die Marktfähigkeiten der Produkte und damit die weiteren Wettbewerbschancen der Unternehmen weitestgehend ausgeklammert.

Die Patentsituation wird nachfolgend noch einmal zusammengefasst; anschließend werden aber auch mögliche Schwachstellen dieser Betrachtung skizziert. Als weitere Wettbewerbsindikatoren werden die Finanzstärke sowie die Fachexpertise in der Informations- und Datenverarbeitung kurz beschrieben. Genauere Analysen könnten Gegenstand weiterer Studien sein. Die Überlegungen fußen zu einem großen Teil auch auf unseren Expertenbefragungen.

---

23 Die Begriffe entstammen der sogenannten „Zulieferpyramide“, in der die Fertigungsstruktur vom ersten Lieferanten bis hin zum Produzenten des Endprodukts dargestellt ist. Ganz unten stehen die Hilfs- und Rohstoffzulieferer (Tier-4), darüber die Teilezulieferer (Tier-3), danach die Komponentenzulieferer (Tier-4), dann die Modul- oder Systemzulieferer (Tier-1) und ganz oben die OEMs (vgl. Schulte 2013, S. 310).

### 4.3.1 Innovationskraft anhand von Patenten

Der Wettbewerb um das autonome Fahren ist im ersten Schritt ein Innovationswettbewerb technologischer Entwicklungen (Bardt 2016, S. 50). Eine beliebte Messgröße für die Innovationskraft von Unternehmen sind Patente, die nicht nur deren Forschungs- und Entwicklungserfolge abbilden, sondern Auskunft über die technologische Binnenstruktur einer Branche geben. Patente sind keine hinreichende, aber häufig notwendige Bedingung für den wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen – insbesondere im Technologiesektor (Koppel 2018, S. 5). Sie garantieren das exklusive Nutzungsrecht eigener Erfindungen für einen Zeitraum von zu meist 20 Jahren.

Seit einiger Zeit ist die Anzahl neuer Patentanmeldungen zum autonomen Fahren stetig steigend. Während im Jahr 2010 noch 930 neue Patente in den Technologiefeldern „Autonomes Fahren – Kurssteuerung allgemein“, „Assistenzsysteme für die Antriebssteuerung“, „Assistenzsysteme für die Verkehrssteuerung“, „Elektronik im Fahrzeug allgemein“, „Navigation“ sowie „Sensortechnik und Umfeldsensorik“ angemeldet wurden, waren es 2017<sup>24</sup> bereits 2.633<sup>25</sup>.

Bei den in Deutschland gültigen Patenten liegen die heimischen Hersteller mit 52 Prozent deutlich vorne, gefolgt von Japan mit 28 Prozent, den USA mit elf Prozent, Frankreich mit fünf Prozent und der Republik Korea mit drei Prozent (DPMA 2019a); eine Verteilung, die erkennbare Ähnlichkeiten zu den zuvor zitierten Marktanteilen im Premiumsegment hat (siehe Abbildung 11).

Auch bei den international gültigen Patenten wird die Innovationskraft der deutschen Automobilindustrie bestätigt: unter den zehn Unternehmen mit den meisten Patentanmeldungen zum autonomen Fahren seit 2010 befinden sich sechs deutsche Vertreter. Das geht aus Analysen von Bardt (2016, 2017) hervor, deren Ergebnisse in Diagramm 1 sowohl zum Juli 2016 als auch zum Juli 2017 dargestellt sind. An der Spitze rangiert der deutsche Zulieferer Bosch, der seinen Vorsprung im Vergleich zum Vorjahr noch einmal deutlich ausbauen konnte. Danach folgen Audi, Continental, Ford, General Motors, BMW, Toyota und Volkswagen. Bemerkenswerterweise steht Alphabet – ehemals Google – nur knapp hinter Daimler und in Schlagdistanz zu Volkswagen, Toyota und BMW (vgl. Bardt 2016).

24 Neuster, vom Deutschen Patent- und Markenamt veröffentlichter Stand.

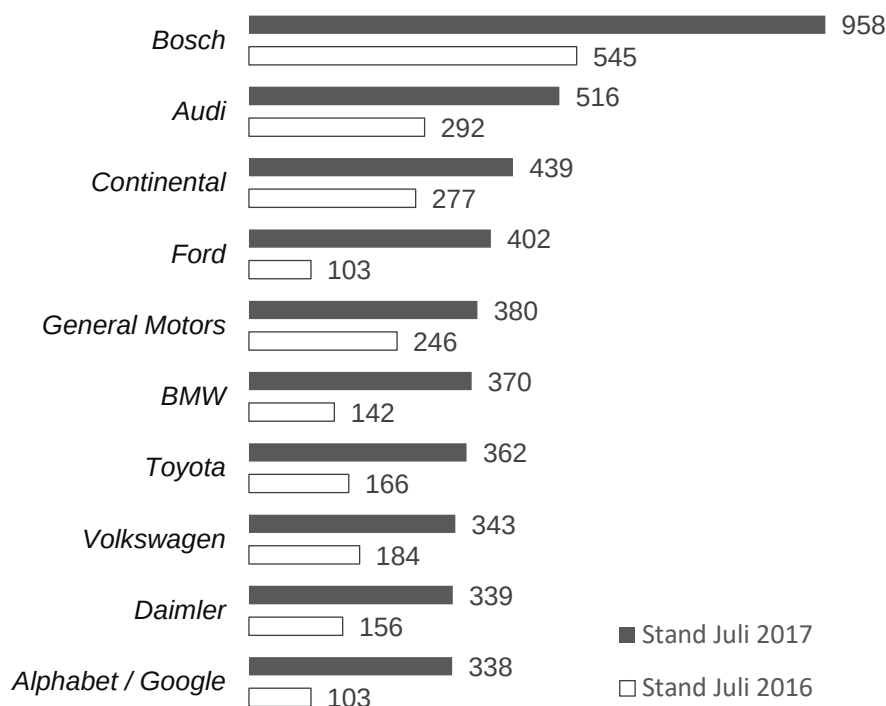
25 Die Zuordnung orientiert sich an sogenannten „IPC-Klassen“ (*International Patent Classification*) eines international gültigen Klassifizierungssystems, das den gesamten Bereich der Technik hierarchisch gliedert. Es gibt keine gesonderte IPC-Klasse für das autonome Fahren, die Auswertung ist aber eine möglichst genaue Annäherung (vgl. DPMA 2019).



Weiterhin hat Bardt (2016) insgesamt 70 Unternehmen, die mit dem autonomen Fahren in Verbindung stehen, in vier Gruppen unterteilt: 22 internationale Automobilhersteller, 25 große Zulieferer, 17 Technologie- und Elektronikunternehmen und sechs Herausforderer wie Tesla, Apple und Google. Etwa die Hälfte der 2.838 in der Patentdatenbank der *World Intellectual Property Organization* gelisteten Patente zum autonomen Fahren, die seit 2010 angemeldet wurden, entfällt auf traditionelle Automobilhersteller, ein Drittel auf Zulieferer und bisher nur sieben Prozent auf die Herausforderer.

Unter den Automobilherstellern liegt der deutsche Anteil bei 51 und den Zulieferern bei 82 Prozent; unter den Herausforderern gibt es keine deutsche Beteiligung. Über alle Gruppen hinweg liegt der Anteil deutscher Patente bei 58 Prozent (Bardt 2016).

*Diagramm 1: Patentanmeldungen für autonome Fahrtechnologien seit 2010*



*Quelle: eigenes Diagramm, Daten aus Bardt (2016, 2017)*

In unseren Experteninterviews wurde die technologische Vorreiterstellung der deutschen Automobilindustrie ebenfalls bestätigt, allerdings sei die Patentaufteilung – anders als häufig kolportiert – nur ein schwacher Indi-

kator für deren wirtschaftlichen Erfolg, schließlich werden die Marktfähigkeiten der Erfindungen weitestgehend ausgeklammert. Genauso verrät die bloße Patentanzahl nichts über deren Inhalt. Schon in der Vergangenheit hat es deutsche Erfindungen gegeben, von denen andere Volkswirtschaften deutlich stärker profitiert haben – etwa das MP3-Audioformat, der „Walkman“, das Telefax oder Hybridantriebe in Kraftfahrzeugen.

Dass Patente nicht alle Innovationsbemühungen adäquat abbilden, zeigt unter anderen auch das Beispiel Tesla. Trotz vieler Kritik und aufgeschobener Versprechungen ist das Unternehmen zu einem Innovations-treiber der Elektromobilität avanciert, der sich beim autonomen Fahren nochmals engagierter präsentiert: Bereits 2020 sollen alle aktuellen Verkaufsmodelle vollautonom fahren können. Dafür bedürfe es – wie schon zuvor erwähnt – nur eines Softwareupdates; alle anderen technischen Komponenten werden bereits serienmäßig verbaut. Darunter auch der sogenannte „Full Self Driving Chip“, der eigens für das autonome Fahren konzipiert wurde. Bei einer Fertigungsgröße von nur 37,5 mal 37,5 mm sind darauf sechs Milliarden Transistoren verbaut, die 2,5 Milliarden Pixel pro Sekunde verarbeiten und eine Bandbreite von 64 Gigabyte pro Sekunde haben, um die Videoaufnahmen der Fahrzeugkameras in Echtzeit auswerten zu können.

Der Chip wird, wie auch die meisten anderen technischen Komponenten, doppelt verbaut, um mögliche Ausfälle zu kompensieren. Insgesamt wird so eine Leistung von 144 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde<sup>26</sup> erzielt. Damit hat Tesla nicht nur erstmalig eine Chipeinheit entwickelt, sondern die für diese Anwendungszwecke schnellste überhaupt. Die vorherige Lösung, die auf dem Modell „Drive Xavier“ von Nvidia basierte, wurde um das Siebenfache übertroffen (Tesla 2019; Nvidia 2019).

Seine bisherigen Entwicklungen hat Tesla einem Fachpublikum detailliert vorgestellt. Auf die Frage, warum man die eigene Forschung derart offenlege und sogar erkläre, entgegnete Elon Musk – Geschäftsführer von Tesla – dass man die Konkurrenz nicht scheue und seit anderthalb Jahren an der zweiten und wiederum drei Mal schnelleren Generation des Chips arbeite (Tesla 2019).

Ob Tesla es tatsächlich schaffen wird, ab 2020 – oder kurz darauf – vollautonome Fahrzeuge erfolgreich im Mischverkehr einzusetzen, dürfe laut einigen unserer befragten Experten bezweifelt werden. Sicherlich werden die Forschungsbemühungen auch medienwirksam präsentiert, um neue Investoren für sich gewinnen zu können. Nichtsdestoweniger ist der bisherige Fortschritt des Unternehmens bemerkenswert, auch weil es nicht in den Bestenlisten der Patentanalysen auftaucht (s. o.).

---

26 144 „TOPS“ (Trillion operations per second).

In einer jährlichen Befragungsstudie der Beratungsgesellschaft KPMG wurde Tesla 2018 unter 907 Führungskräften aus der Automobilbranche bereits hinter BMW auf Platz zwei der Technologieführer beim autonomen Fahren im Jahr 2025 gewählt – 2016 (n = 800) war es noch Platz sieben (vgl. Becker et al. 2018).

#### **4.3.2 Finanzstärke und Fachexpertise in der Datenverarbeitung**

Sowohl die Entwicklung autonomer Fahrtechnologien als auch deren Bereitstellung ist kostenintensiv, weshalb im Wettbewerb um das autonome Fahren auch die Finanzstärke der Unternehmen eine wichtige Rolle spielen wird. Dahingehend stellen vor allem Technologieunternehmen eine große Konkurrenz für die etablierten Automobilhersteller und -zulieferer dar, denn so groß deren Vorsprung bei den Patenten ist, so überlegen scheint die Finanzstärke großer Technologiekonzerne.

Allein Google, Amazon, Apple und Facebook, die alle samt zum autonomen Fahren forschen, haben eine zehn Mal höhere Marktkapitalisierung als die deutschen Automobilhersteller. Zusammen mit Microsoft und Netflix, die ebenfalls ein Interesse an der Bereitstellung milliardenschwerer Mehrwertdienste in autonom fahrenden Autos (vgl. Dungs et al. 2016) haben dürften, liegt deren Marktwert bei 4,2 Billionen Dollar<sup>27</sup>.

Weil jedoch das Kerngeschäft mit Smartphones, Tablets und sozialen Mediendiensten stagniert und sogenannte Home-Devices oder Wearables das nicht allein kompensieren können, wird intensiv an neuen Einnahmequellen geforscht, die auch eine derart hohe Marktkapitalisierung weiterhin rechtfertigen würden.

Unter den zehn Unternehmen mit den weltweit höchsten Forschungs- und Entwicklungsausgaben befinden sich sechs Technologie-, drei Pharma- und mit Volkswagen auf Platz drei – hinter Amazon und Google – nur ein Automobilunternehmen (vgl. Jaruzelski/Chwalik/Goehle 2018). Während Letztere in der Regel weniger als fünf Prozent ihres Umsatzes für die Forschung und Entwicklung aufwenden, sind es bei Technologieunternehmen oft mehr als zehn Prozent (Beiker et al. 2016, S. 5).

Die Technologiebranche forscht insbesondere auch zur Automobilität. Unlängst hat Amazon in Rivian investiert, einem Elektrofahrzeughersteller (vgl. Rivian 2019). Immer wieder wird auch spekuliert, wofür Apple exemplarisch für die gesamte Branche seine Forschungsinvestitionen über die letzten Jahre deutlich erhöht hat – von knapp über drei Milliarden

---

<sup>27</sup> Eigene Analyse zum Stand 31. Dezember 2018.

Dollar im Jahr 2012 auf über 11 Milliarden im Jahr 2018 (vgl. Apple 2012; 2018). Dieser Anstieg kann kaum durch das bisherige Kerngeschäft erklärt werden.

Vielmehr scheint Apple seine Erfahrungen aus der Technologiebranche auch in der Automobilität nutzen zu wollen. Entsprechende Meldungen beziehen sich auf das „Project Titan“ (vgl. Taylor/Oreskovic 2015; Gallagher 2015; Fitzpatrick 2015). Laut Mickey Drexler, einem langjährigen Vorstandmitglied von Apple, wollte schon Steve Jobs die Automobilindustrie revolutionieren (Carr 2012).

Im Jahr 2016 hat das Unternehmen eine Milliarde US-Dollar in DiDi Chuxing investiert, dem chinesischen Pendant zu Uber (Reuters 2016). Etwas später hat dieser in der Nähe der Apple-Hauptzentrale in Kalifornien ein neues Labor zur Entwicklung autonomer Fahrzeuge eröffnet (vgl. DiDi Labs 2019). Das Automobil sei das ultimative mobile Endgerät, so Jeff Williams, Vorstandmitglied von Apple (Williams, 2015). Darin zeigt sich einmal mehr, dass es aus Sicht der Technologieunternehmen nicht nur um die autonomen Fahrtechnologien als solche, sondern die digitalen Vertriebsplattformen gehen dürfte. Das ist auch die übergreifende Argumentation der Experten in unserer Befragung.

Weil die Bedeutung der Informations- und Datenverarbeitung in Kraftfahrzeugen (siehe Abschnitt 3.2.3), aber auch in deren Bereitstellung, deutlich zunimmt, müssen sich die etablierten Anbieter in Zukunft umso mehr in der Kernkompetenz der Technologieunternehmen messen. Jene Marktstellung, die sich die deutsche Automobilindustrie im Premiumsegment für Kraftfahrzeuge erarbeitet hat (siehe Abschnitt 4.2), halten Apple, Amazon, Google oder Facebook in der Informations- und Datenverarbeitung inne. Das betrifft insbesondere auch die Fachexpertise zur Entwicklung Künstlicher Intelligenzen.

Nach einer Analyse von Beiker et al. (2016) sind in der Automobilbranche zwar weltweit mehr Arbeitskräfte beschäftigt, jedoch beträgt der Anteil der Softwarespezialisten dort nur 8,5 Prozent – bei den Technologieunternehmen sind es 62,2 Prozent. Die absolute Anzahl der Fachkräfte für Künstliche Intelligenzen ist bei Letzteren sogar 28 Mal höher (vgl. Beiker et al. 2016, S. 6). Ein Blick auf die Stellenausschreibungen der deutschen Hersteller und Zulieferer zeigt, dass intensiv nach geeigneten Fachkräften gesucht wird, jedoch ist auch hier die Konkurrenz durch andere Unternehmen und Branchen groß.

## 5. Beispiel zweier Technologie-Roadmaps und ihrer Anwendung

In diesem abschließenden Kapitel stellen wir zwei beispielhafte Technologie-Roadmaps für das autonome Autofahren vor und zeigen, wie man mit ihnen arbeiten könnte. Die Technologie-Roadmaps integrieren die in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Ergebnisse, die wir aus der Literatur und den Experteninterviews gewonnen haben. Dazu werden die in Kapitel 2 besprochenen Konzepte konkret angewandt.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut: Zunächst erläutern wir unsere Annahmen und die Methode, mit der wir die Technologie-Roadmaps erstellt haben. Anschließend beschreiben wir deren Bestandteile. Eine Technologie-Roadmap ist ein Denk- und Kommunikationswerkzeug. Der Denkprozess findet vor allem während der Erstellung statt – dem Technologie-Roadmapping – und kann hier nicht angemessen dargestellt werden.

Allerdings können wir zeigen, wie man anhand einer Technologie-Roadmap strategische Fragen diskutieren kann, also wie man die Roadmap „anwendet“. Dabei geht es, wie bereits erwähnt, insbesondere um die Frage der strategischen Zielbestimmung, der Erörterung der durch die aktuelle Situation gegebenen Ressourcen und die Möglichkeiten, das Ziel zu erreichen.

Da das Technologie-Roadmapping eine Methode der Zukunftsforschung ist, gibt es immer verschiedene Möglichkeiten, wie die resultierenden Technologie-Roadmaps aussehen könnten (siehe auch Abschnitt 2.3.2). Jede Roadmap enthält subjektive Annahmen über die Entwicklung von Technologien, Märkten und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Um dies zu veranschaulichen, haben wir auch eine alternative Roadmap entwickelt. Im Gegensatz zur ersten wird darin ein eher disruptives Szenario beschrieben, in dem das autonome Fahren wesentlich schneller erreicht wird. Das spiegelt auch die unterschiedlichen Einschätzungen bezüglich der zeitlichen Realisierbarkeit wider, die in Kapitel 3 vorgestellt wurden. Das Kapitel endet mit einigen Schlussbemerkungen.

### 5.1 Annahmen und Methode

Wie bei jeder Anwendung einer Forschungsmethode sollten auch an dieser Stelle zunächst die Fragestellung und Zielsetzung diskutiert werden. Unser primäres Ziel ist ein didaktisches, d. h. wir möchten zeigen, wie eine Technologie-Roadmap gestaltet und zur Diskussion strategischer Themen angewandt werden könnte.

Diese Zielsetzung hat zwei Implikationen. Zum einen sind die erstellten Roadmaps generisch, also nicht auf einen bestimmten Anwender bezogen. Für das Thema autonomes Autofahren wären verschiedene Anwender denkbar: staatliche Akteure, die sich mit dem autonomen Fahren aus industrie- und umweltpolitischer Sicht befassen, Gewerkschaften, die sich für die möglichen Beschäftigungswirkungen interessieren, oder Unternehmen aus der Automobilbranche. Wir haben grob die Perspektive der deutschen OEMs, also der Automobilhersteller, eingenommen, jedoch ohne uns mit den spezifischen Details eines bestimmten Herstellers zu befassen. Für eine konkretere Anwendung würde man die jeweiligen Unternehmensspezifika genauer berücksichtigen, was nur durch die intensive Einbindung von Unternehmensexperten möglich ist.

Zum anderen haben wir aus Gründen der Übersichtlichkeit auf viele Informationen verzichtet, die man in einer spezifischeren Anwendung aufnehmen könnte. Das betrifft z. B. die genauen Technologiebestandteile, die wir zumeist in aggregierter Form darstellen, oder die neuen Wettbewerber, von denen wir nur Waymo und Tesla, nicht aber Uber, Apple und andere in die Roadmaps aufnehmen. Unser Ziel ist es in erster Linie, einen Überblick über das Thema zu bieten, bei dem zu viel Komplexität vom Wesentlichen ablenken würde.

Die Technologie-Roadmaps wurden sukzessive auf Grundlage der Literaturrecherche und Auswertung der Experteninterviews erstellt. Dazu wurden zunächst die für den Studienzweck relevanten Ebenen und ein geeigneter Zeitraum definiert. Anschließend wurden die wichtigsten Bestandteile der Technologieentwicklung den einzelnen Ebenen zugewiesen und zeitlich verortet. Danach wurde die Analyse in der Definition von Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Ebenen fortgesetzt. Die dabei entstandenen Entwürfe wurden immer wieder auf ihre Aussagekraft hin überprüft und fortlaufend angepasst. Dadurch wurde auch deutlich, dass die Aufteilung in eine konservative und eine disruptive Roadmap im Sinne eines Szenariodenkens den aktuellen Forschungsstand und die gewonnenen Erkenntnisse aus den Experteninterviews am besten widerspiegelt.

Ein besonderes Augenmerk wurde auch auf die Lesbarkeit und Verständlichkeit der Grafiken gelegt. Der gesamte Roadmapping-Prozess – von seinem Beginn bis hin zu den fertigen Roadmaps – orientiert sich methodisch an der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Vorgehensweise.

## 5.2 Technologie-Roadmap

Abbildung 13.1 stellt unsere Basis-Technologie-Roadmap dar. Die Roadmap enthält in der Vertikalen vier Ebenen: die Technologieebene, die Produktebene, die Marktebenen und die Ebene der Treiber aus dem gesellschaftlichen und politischen Umfeld. Die Technologieebene ist weiter in die Unterebenen der Fahrzeugtechnologien und Infrastrukturen unterteilt. Zusätzlich hätte auch noch eine weitere Unterebene für die Informationstechnologien eingeführt werden können.

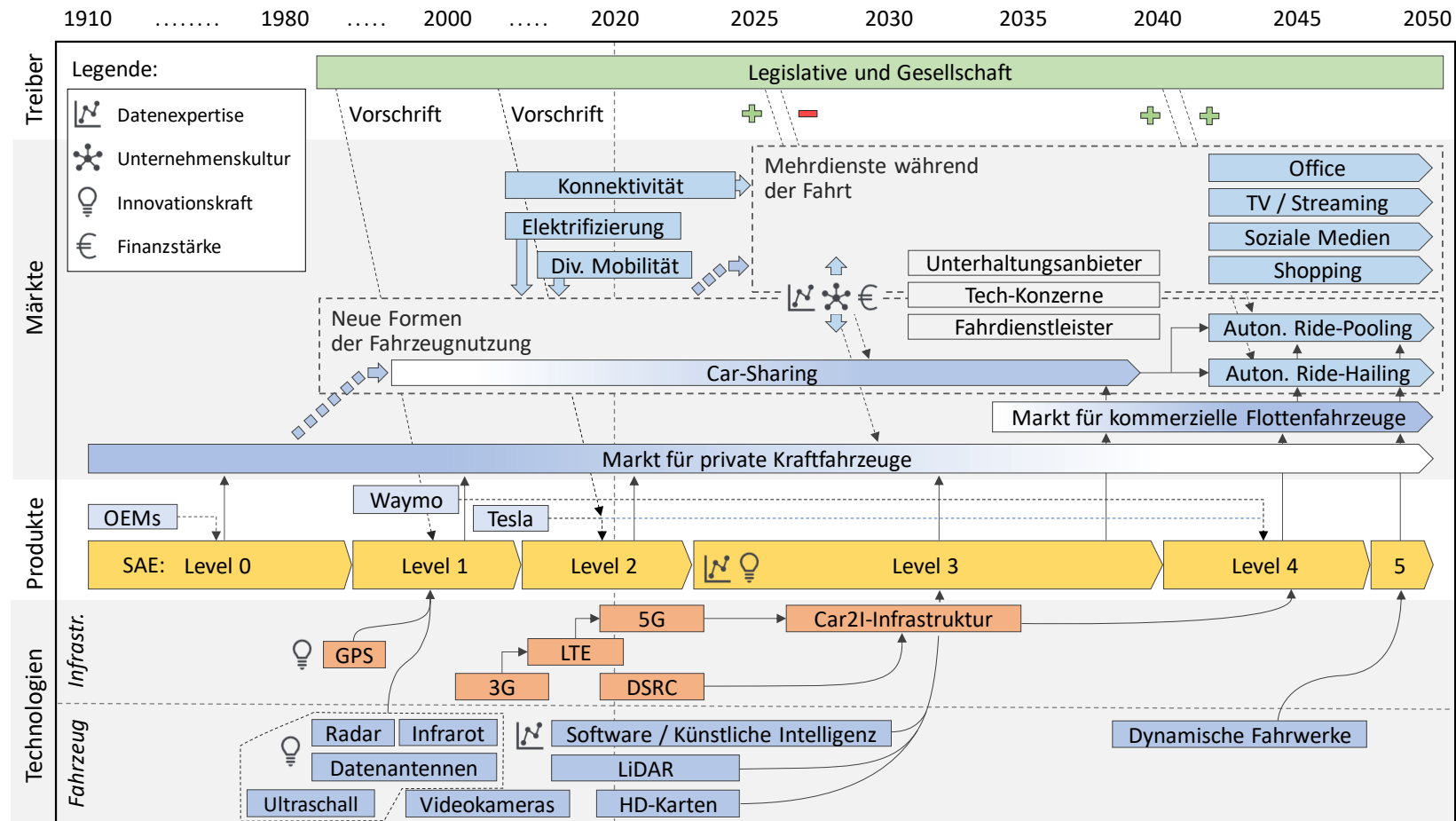
Die *Software* und *Künstliche Intelligenz* tauchen in den Roadmaps als Fahrzeugtechnologien auf, was der Perspektive der Automobilhersteller entsprechen dürfte. Die Produktebene wird durch die SAE-Level strukturiert, die als deutlich sichtbare, gelbe Pfeile dargestellt sind und somit direkt ins Auge fallen. Dieser Effekt ist beabsichtigt, weil die SAE-Level die Hauptfahrspur der Roadmaps bilden. Genauer gesagt geht es um Automobile mit autonomen Fahrsystemen, nicht aber um ganz konkrete Fahrzeugmodelle.

Auf der Marktebene sind die Märkte für private Kraftfahrzeuge, kommerzielle Flottenfahrzeuge, neue Formen der Fahrzeugnutzung und für Zusatz- oder Mehrwertdienste während der Fahrt angezeigt. Der Markt für private Kraftfahrzeuge ist der traditionelle Verkaufsmarkt, der bis zum linken Rand der Roadmaps reicht. Durch die farbliche Aufhellung zum rechten Rand hin wird angedeutet, dass dieser Markt an Bedeutung verlieren könnte. Umgekehrt ist es beim Markt für autonome Fahrzeuge, die in kommerziellen Flotten eingesetzt werden könnten und die SAE-Level 4 und 5 implizieren.

In unserer Expertenbefragung wurde vereinzelt auch darauf hingewiesen, dass es in Zukunft dynamischer Fahrwerke bedürfe, die etwa auch in schnelleren Kurvenfahrten ein angenehmes Arbeiten ermöglichen. Nur so wäre das Nachgehen anderer Tätigkeiten während der Fahrt in angenehmer und effizienter Weise möglich.

Die horizontale Zeitachse der Roadmap erstreckt sich von der Anfangszeit der Automobilproduktion zum Beginn des 20. Jahrhunderts bis zum Jahr 2050. Dadurch, dass die Gegenwart etwas links der Mitte verortet ist, wird die Zukunft optisch stärker betont als die Vergangenheit. Das wurde bereits in Abschnitt 2.2 angedeutet und ist angemessen, weil es sich beim Technologie-Roadmapping um ein Planungsinstrument handelt.

Abbildung 13.1: Eine Technologie-Roadmap für das autonome Fahren



Quelle: eigene Abbildung



Zwar beginnen die Roadmaps zeitlich bereits 1910, jedoch liegt der eigentlich interessante Beginn um das Jahr 1980, als diejenigen Technologien entwickelt wurden, die als Grundlage der Fahrassistenz nach SAE-Level 1 dienen.

Eine wichtige Rolle spielen auch die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen des autonomen Fahrens. Bereits in den vergangenen 30 Jahren wurden gesetzliche Vorschriften erlassen, die Fahrsicherheitssysteme wie ABS und ESP verpflichtend machten und somit einen entscheidenden Einfluss auf die Weiterentwicklung des Autofahrens auf die SAE-Level 1 und 2 hatten.

In Zukunft wird es sowohl von der Gesetzgebung als auch der gesellschaftlichen Akzeptanz abhängen, wie sich neue Mobilitätsformen und der Markt für private Kraftfahrzeuge entwickeln werden. In der kurzen Frist deutet Vieles darauf hin, dass die gesellschaftliche Akzeptanz neuer Mobilitätsformen eher gering ist, was in der Roadmap durch das rote Minus ausgedrückt wird. Allerdings könnte sich das Meinungsbild auch drehen – etwa durch die Fridays-for-Future-Bewegung oder die politischen Initiativen zur Förderung der nicht-automobilen Mobilität. Durch die grünen Plus-Zeichen, die ebenfalls neben den von den gesellschaftlichen Treibern ausgehenden Pfeilen stehen, wird dargestellt, wie man den Einfluss dieser Faktoren im Zeitablauf einschätzen könnte.

In der langen Frist bis 2040 erwarten wir hier beispielhaft, dass sich die Impulse aus dem gesellschaftlichen und politischen Umfeld zugunsten neuer Mobilitätsformen wie dem autonomen Ride-Hailing und Ride-Pooling entwickeln werden. Dafür sprächen erwartete Nachhaltigkeits- und Sicherheitseffekte. Jedoch wäre es auch denkbar, dass es durch externe Einflüsse zu Hemmnissen in diesem Bereich kommt. So könnte man sich mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz des autonomen Ride-Hailing aufgrund von Datenschutzbedenken und allgemeiner Technikskepsis vorstellen.

Andererseits könnten die Verkehrsprobleme insbesondere in Städten weiter zunehmen, so dass es gesetzgeberische Maßnahmen gegen weiteren Individualverkehr gibt. Schließlich könnte man sich auch protektionistische Maßnahmen Deutschlands oder der EU gegenüber den Technologieunternehmen aus den USA und China vorstellen, wodurch neue Formen der Fahrzeugnutzung und die Ausweitung von Zusatzdiensten während der Fahrt gebremst würden.

Die den Roadmaps beigefügten Legenden sollen einen Eindruck darüber vermitteln, welche Kompetenzen an den jeweiligen Stellen der Technologieentwicklung besonders erforderlich sein könnten. Damit soll insbesondere auch betont werden, dass im zukünftigen Markt für Automobilität nicht mehr nur vorrangig ingenieurswissenschaftliche Innovationskraft,

sondern zu einem großen Teil auch die Expertise in der Informations- und Datenverarbeitung, eine flexible Unternehmenskultur im Sinne der schnellen Adaption neuer Trends und die Finanzstärke gefragt sein werden.

## 5.3 Anwendung der Roadmap

Die Anwendung der vorgestellten Technologie-Roadmap könnte bedeuten, dass ein deutscher OEM auf ihrer Grundlage eine Technologie- und Marktstrategie für die nächsten 20 bis 30 Jahre entwickeln und kommunizieren möchte. Wir skizzieren, wie dies geschehen könnte. Es sei noch einmal betont, dass in der Praxis der Entstehungsprozess einer Roadmap mindestens genauso wichtig wie das Resultat selbst ist, weil die Beteiligten dabei häufig zu neuen Einsichten und einer gemeinsamen Einschätzung der Lage, Ziele und Handlungsoptionen gelangen. Wie bereits im zweiten Kapitel erläutert, kann eine Technologie-Roadmap dazu verwendet werden, ein Narrativ zu transportieren, das den Adressaten einer Roadmap Antworten auf die strategischen Fragen „Wo wollen wir hin?“, „Wo stehen wir?“ und „Wie kommen wir zum Ziel?“ vermittelt.

### 5.3.1 Mögliche Ziele

Die grundlegende strategische Frage eines deutschen Automobilherstellers dürfte sein, auf welchen Märkten er im Jahr 2050 seine Gewinne erwirtschaften möchte. Wie in der Roadmap dargestellt, kann davon ausgegangen werden, dass der Markt für private Kraftfahrzeuge mit zunehmender Automatisierung an Bedeutung verliert. Es wäre sogar denkbar, dass er mit der Einführung der SAE-Level 4 und 5 unter bestimmten Umständen nahezu vollständig zugunsten eines Marktes für „Mobility as a Service“ verschwindet.

Ein Anwender der Roadmap könnte sein Ziel im Schaubild lokalisieren. Aus Sicht der deutschen OEMs sind folgende Ziele oder Geschäftsmodelle vorstellbar:

- a) Es gibt ein kleines Segment sehr hochwertiger Privatautos, bei denen das SAE-Level 5 zwar möglich, aber nur eine Option ist. Hierbei spielt die Freude am Fahren und der Besitz eines hochwertigen Automobils als Statussymbol eine wichtige Rolle. Der OEM konzentriert sich deshalb auf einen Nischenmarkt, der aber eine hohe Gewinnmarge hat.
- b) Der private Besitz von Automobilen spielt praktisch keine Rolle mehr, weil er nahezu vollständig durch neue Formen der Fahrzeugnutzung

im Flottenbetrieb ersetzt wurde. Der OEM verdient weiterhin hauptsächlich am Verkauf der Fahrzeuge, jedoch nicht mehr an private Kunden, sondern gewerblichen Flottenbetreiber, deren Marktmacht die Profitabilität des OEMs vermindert.

- c) Der private Besitz von Automobilen spielt praktisch keine Rolle mehr, weil er nahezu vollständig durch neue Formen der Fahrzeugnutzung im Flottenbetrieb ersetzt wurde. Der OEM ändert sein Geschäftsmodell und verdient sowohl an der Herstellung der Fahrzeuge als auch an deren Betrieb. Er ergänzt sein traditionelles Kerngeschäft durch das Angebot von Mobilitätsdienstleistungen.
- d) Der private Besitz von Automobilen spielt auch hier praktisch keine Rolle mehr, weil er nahezu vollständig durch neue Formen der Fahrzeugnutzung im Flottenbetrieb ersetzt wurde. Zusätzlich herrscht im Mobilitätsmarkt große Konkurrenz, so dass Mobilitätsdienstleistungen weniger rentabel sind und Gewinne hauptsächlich durch Zusatzdienste wie Unterhaltungsangebote oder Shopping erzielt werden. Der OEM ändert sein Geschäftsmodell und verdient sowohl an der Herstellung der Fahrzeuge als auch am Angebot von Zusatzdienstleistungen.

Wir nehmen zu Illustrationszwecken an, dass Option d) das Ziel sein soll.

### **5.3.2 Aktueller technischer Stand**

Gemäß der Patente ist die Ausgangslage der deutschen OEMs und ihrer Zulieferer im Feld der Fahrzeugtechnologien sehr gut. Eine Herausforderung besteht aber im Bereich der Informations- und Datenverarbeitung, was durch das entsprechende Symbol auf der Technologieebene gekennzeichnet ist (siehe Legende). Für alle Fahrzeughersteller besteht ein hoher Entwicklungsbedarf bei der Software zur Bewältigung komplexer Fahrumgebungen, die für das Erreichen des SAE-Level 3 erforderlich ist.

Für einen deutschen OEM könnte im Vergleich zu einem US-amerikanischen Technologieunternehmen wie Waymo aber auch noch die Herausforderung hinzukommen, IT-Kompetenzen für die Organisation von Mobilitätsdienstleistungen und dem Angebot von digitalen Zusatzdiensten aufzubauen. Das sind die Kernkompetenzen der Technologieunternehmen, die in diesem Bereich aktuell einen deutlichen Wettbewerbsvorteil haben.

Hinsichtlich der Infrastruktur hat Deutschland mit seinem schwachen Mobilfunknetz bisher einen Nachteil gegenüber anderen Ländern wie Japan, Südkorea und den USA. Zwar hat der Aufbau des 5G-Netzes mit der Vergabe der Lizenzen an Telekommunikationsunternehmen begonnen,

jedoch dürfte es bis Mitte der 2020er Jahre dauern, bis eine umfassende Netzabdeckung erreicht wird. Die deutschen Automobilhersteller erwägen gegenwärtig den Erwerb eigener 5G-Lizenzen, jedoch vorerst nur für lokale, industrielle Mobilfunknetze.

Wie bereits erwähnt ist der 5G-Standard laut unserer Expertenbefragung keine Grundvoraussetzung für das hochautomatisierte Fahren als solches, dafür aber für verknüpfte, digitale Mobilitätskonzepte und die Bereitstellung von Mehrwertdiensten während der Fahrt.

## **5.4 Zwei Szenarien**

In den beiden nachfolgenden Abschnitten wird zunächst noch einmal das evolutorisches Basisszenario und danach ein disruptives Szenario für die Einführung autonomer Fahrzeuge und die damit einhergehenden Dienstleistungen beschrieben.

### **5.4.1 Evolutorisches Szenario**

Im ersten Szenario, das bereits in Abbildung 13.1 gezeigt wurde, gibt es eine lange Phase der Automatisierung zu SAE-Level 3, die innerhalb der nächsten fünf Jahre beginnt und erst Anfang der 2040er Jahre durch das SAE-Level 4 abgelöst wird. Wie schon zuvor beschrieben soll die Zielperspektive einer deutschen OEM darin bestehen, sowohl an der Herstellung von Fahrzeugen als auch am Angebot von Zusatzdienstleistungen Geld zu verdienen (Option d). Ein deutscher OEM würde sich also zunächst darauf konzentrieren, die erforderlichen technischen Innovationen zu erbringen, die schnell zum SAE-Level 3 führen.

Parallel dazu arbeiten die deutschen Automobilhersteller auch daran, einen Einstieg in den Markt für neue Formen der Fahrzeugnutzung zu schaffen, wie etwa Volkswagen mit der Ride-Sharing-Tochter Moia oder die Kooperation von Daimler und BMW mit ihrem Gemeinschaftsunternehmen ShareNow. Der Wandel vom reinen Automobilhersteller zu einem Anbieter von Fahr- und Mehrwertdiensten würde in diesem Szenario erst ab den 2030er Jahren erfolgen, wenn das Level-3-Fahren auch durch den Infrastrukturausbau und die Car2I-Technologien schon weiter fortgeschritten und allmählich ein Rückgang im Markt für private Kraftfahrzeuge zu bemerken ist.

Dieser Wandel ist eine nicht zu vernachlässigende Herausforderung für die deutschen Unternehmen, die sowohl den Ausbau der Datenexper-

tise für Fahr- und Mehrwertdienste als auch einen Wandel der Unternehmenskultur erfordert. Die Unternehmens- und Professionskultur müsste sich spätestens in zehn Jahren merklich weg von einer Ingenieurs- hin zu einer IT-Kultur gewandelt haben. Da vor allem die Wettbewerber aus der Technologiebranche sehr finanzstark sind, sind auch hohe finanzielle Herausforderungen zu gegenwärtigen.

Grundsätzlich sind die OEMs auch mit einem starken Lock-in-Effekt konfrontiert. Der aktuelle Erfolg im traditionellen Verkauf von privaten Fahrzeugen bietet hohe Gewinne, so dass kaum Anreize für die Schaffung alternativer Mobilitätsformen bestehen. Ähnliches lässt sich bereits bei der Elektromobilität beobachten.

Beim autonomen Fahren liegt die Motivation der Technologieunternehmen und neuer Automobilhersteller darin, sich frühzeitig einen Technologie- und Markenvorsprung zu sichern, auch wenn das Geschäft insbesondere mit Fahrdienstleistungen bisher kaum Gewinne oder sogar Verluste bringt. Später aber könnten sich daraus marktbeherrschende Stellungen entwickeln. Wegen des Lock-in-Effekts empfehlen wir die bewusste Ausgliederung der Zukunftsthemen in Tochterunternehmen, die den Markt unabhängig vom aktuellen Kerngeschäft erkunden können. Diese Empfehlung wurde auch in unseren Experteninterviews mehrfach formuliert.

Das gezeigte Szenario beschreibt eine eher evolutorische Entwicklung mit graduellen Übergängen. Unsere Experteninterviews und die Auswertung öffentlich verfügbarer Informationen legen nahe, dass dies das Szenario ist, von dem in Deutschland aktuell vielfach ausgegangen wird.

### **5.4.2 Disruptives Szenario**

Die in Abbildung 13.1 vorgestellte Technologie-Roadmap könnte in etwa der Perspektive der deutschen Automobilhersteller entsprechen. Aus Sicht neuer Wettbewerber wie Tesla oder Waymo könnte sie jedoch anders aussehen. In Abbildung 13.2 ist deshalb eine alternative Roadmap dargestellt, die deren Perspektive einnimmt. Für die deutschen Automobilhersteller wäre dieses Szenario disruptiver und würde eine deutlich andere Strategie erfordern.

Das zweite Szenario ist vor allem dadurch gekennzeichnet, dass das automatisierte Fahren nach SAE-Level 3 praktisch übersprungen wird und das SAE-Level 4 unmittelbar bevorsteht. Dies entspricht vor allem den Strategien von Tesla und Waymo. Wie schon zuvor erwähnt, möchte Tesla bereits ab 2020 vollautonom fahren können und verzichtet auf die Entwicklung von LiDAR-Systemen. Durch die starke Betonung von Bilder-

kennung und künstlicher Intelligenz sollen dessen Fahrzeuge weitestgehend unabhängig von der Infrastruktur und Car2X-Kommunikation sein. Diese Technologien fehlen deshalb in der zweiten Roadmap. Möglicherweise wäre deren Entwicklung auch für die deutschen OEMs überflüssig. Waymo bietet bereits seit einiger Zeit teilautonome Fahrdienstleistungen an.

In diesem Szenario dürfen auch die häufig exponentiellen Lernkurven Künstlicher Intelligenzen nicht unterschätzt werden. Tesla oder Waymo möchten möglichst schnell automatisierte Fahrzeuge in den realen Straßenverkehr bringen, um über deren Sensoren Daten zu sammeln, mit denen die computergestützten Algorithmen sowohl selbständig als auch mit menschlicher Unterstützung lernen.

Schon heute kommunizieren die meisten Fahrzeugmodelle von Tesla untereinander und einem zentralen Rechenzentrum. Sobald ein Fahrzeug in eine unbekannte Verkehrssituation gerät, wird per Bildvergleich der Videokameras weltweit nach anderen Fahrzeugen in ähnlichen Situationen gesucht. Die gesammelten Daten ermöglichen dann eine deutlich bessere Entscheidungsfindung der Künstlichen Intelligenz, die auf große Datenmengen angewiesen ist. Bei Bedarf bewerten auch menschliche Experten die Situation. Wenn das Problem danach gelöst ist, wird die gesamte Fahrzeugflotte darüber informiert. Auf diese Weise wird die Künstliche Intelligenz sukzessive trainiert und bestimmte Verkehrssituationen gelten fortan als gelöst.

Sollte diese Strategie erfolgreich sein, würde sie einen großen Wettbewerbsvorteil für Tesla bringen und erhebliche Implikationen für die deutschen Hersteller haben. So müsste sich auch deren Entwicklungszeit für geeignete Informationstechnologien und Künstliche Intelligenzen deutlich verkürzen. Zudem könnte die Entwicklung von LiDARs eine Sackgasse darstellen. Ebenso sei erwähnt sein, dass Tesla die Technologien schon heute in vergleichsweise günstigen Fahrzeugmodellen der Mittelklasse anbietet.

Wenn aufgrund hoher Lerneffekte im Bereich der Künstlichen Intelligenz der Übergang von SAE-Level 4 zu 5 bereits Mitte der 2020er Jahre möglich ist, könnten sich ab dann auch die Märkte für neue Mobilitätsformen und Mehrwertdienste dynamisch entwickeln, was gleichzeitig auch zu einem deutlich schnelleren Rückgang des Marktes für private Kraftfahrzeuge führen könnte.

Die Entwicklungen sind also eng an die Verfügbarkeit des Level-4- und Level-5-Fahrens gebunden. Ein dortiger Durchbruch konnte zu einer sehr raschen Markttransformation führen. Für die deutschen OEMs könnte dies bedeuten, dass sich die entsprechenden Märkte bereits entwickeln, bevor sie die Unternehmenstransformation zu Dienstleistungsanbietern

schaffen. Demnach wäre es zu spät, erst in den 2040er Jahren die Gewinne hauptsächlich mit Dienstleistungen erzielen zu wollen (siehe Option d). Womöglich ist dieses Ziel für die deutschen OEMs dann überhaupt nicht mehr erreichbar, sondern nur noch die oben beschriebene Option b).

Die heutigen OEMs wären dann Fahrzeugzulieferer großer Flottenanbieter, die von den Technologieunternehmen kontrolliert werden. In der Folge würden sie erheblich an Eigenständigkeit verlieren und in eine starke Abhängigkeit von anderen marktbeherrschenden Unternehmen geraten, vergleichbar mit der Lage der heutigen Zulieferer der deutschen OEMs.

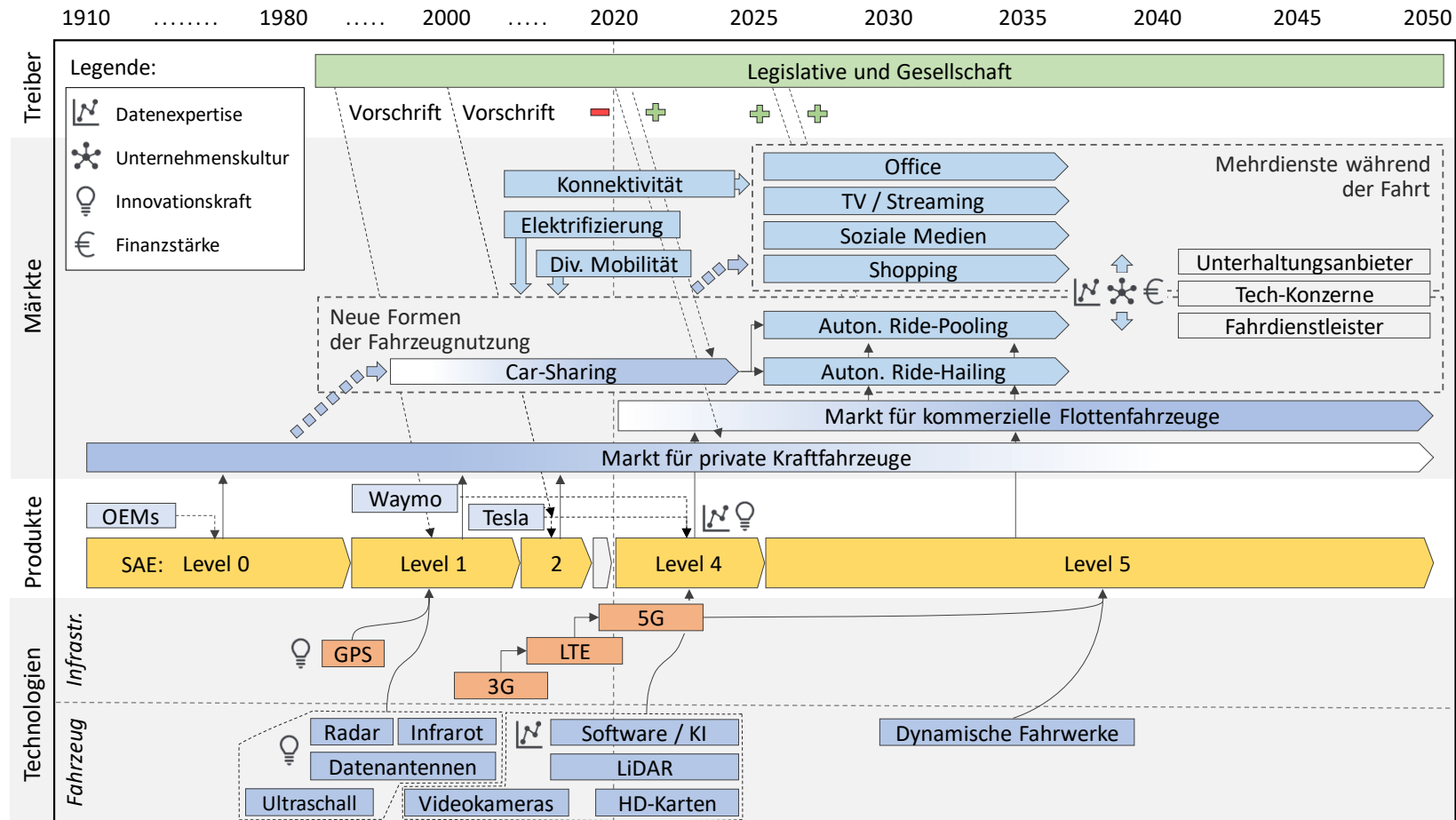
Eine Strategie der deutschen OEMs zum Erhalt der eigenen Marktposition könnte darin bestehen, in naher Zukunft umfassendere, strategische Allianzen mit Technologieunternehmen einzugehen, um die Chance zu wahren, am Dienstleistungsmarkt direkt zu partizipieren und nicht in die Rolle eines zum Zulieferer gewordenen Fahrzeugherstellers zu fallen. Alternativ könnte auch in den Auf- und Ausbau der für die neuen Märkte relevanten Technologien investiert und das eigene Unternehmenskonzept radikal umgebaut werden. Ob dies möglich und realistisch ist, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

In diesem zweiten Szenario könnten die Impulse aus Legislative und Gesellschaft eine noch größere Rolle spielen. Über lange Zeit konnten sich die deutschen Automobilhersteller auf die politische Unterstützung insbesondere auch auf der europäischen Ebene verlassen, wo sich die deutsche Bundesregierung etwa regelmäßig gegen als zu streng empfundene Umweltauflagen einsetzte. Es ist nicht garantiert, dass diese Unterstützung angesichts sich ändernder gesellschaftlicher Stimmungen erhalten bleibt.

Der fortschreitende Klimawandel und die Unzufriedenheit der Bevölkerung mit der Verkehrssituation könnten dazu führen, dass es zu einem kurzfristigen politischen Meinungswandel kommt. Ähnliches geschah im Zusammenhang mit dem Atomausstieg, von dem die deutschen Energieversorgungsunternehmen nach dem Fukushima-Unglück überrascht wurden. Es ist z. B. beachtenswert, dass die CSU unter dem Eindruck der Fridays-for-Future-Bewegung und dem Erstarken der Grünen umweltpolitische Themen zu besetzen versucht und Bundesverkehrsminister Andreas Scheuer neuerdings das Fahrradfahren fördern möchte.

Es ist auch denkbar, dass die schnelle technologische Entwicklung zu SAE-Level 3 zu verstärkten politischen Initiativen zur Förderung alternativer Mobilitätsformen und zu Lasten des Marktes für private Kraftfahrzeuge führt. Auch die vielfach geforderte Abschaffung der Subventionen für Diesel und Benzin gehört in diesen Kontext.

Abbildung 13.2: Eine alternative Technologie-Roadmap für das autonome Fahren



Quelle: eigene Abbildung



## 5.5 Schlussbemerkungen

Kapitel 5 hat unsere Erkenntnisse zur Entwicklung der Technologien und Märkte im Kontext des autonomen Fahrens noch einmal zusammengefasst. Genau darin besteht die zentrale Stärke von Technologie-Roadmaps.

Aus unserer Sicht werfen die skizzierten Entwicklungen zwei zentrale, strategische Fragen auf: Die erste fragt danach, was die relevanten Märkte der Zukunft sein werden, in denen sich die deutschen Automobilhersteller und -zulieferer positionieren möchten. Durch das autonome Fahren wird nicht mehr nur allein das Fahrzeug das entscheidende Produkt sein; auch Mobilitäts- und Mehrwertdienste, bei denen die Technologieunternehmen sehr gut positioniert sind, gewinnen an Bedeutung. Dass der Markt für Automobilität an Komplexität gewinnt, wird in unseren Technologie-Roadmaps durch die Darstellung verschiedener Zukunftsmärkte sichtbar.

Die zweite Frage betrifft die Geschwindigkeit der technologischen Entwicklung zum vollautonomen Fahren. Wie in Abschnitt 3.4 ausführlich diskutiert gibt es unter den Experten hierzu sehr unterschiedliche Ansichten. Weil ein wesentlich schnelleres Erreichen des SAE-Level 4 gegenüber dem Basis-Szenario erhebliche strategische Implikationen hätte, haben wir eine zweite Roadmap erstellt, die eine veränderte Marktentwicklung zeigt und optisch komprimierter ist.

Im Vergleich der beiden Übersichten wird die zentrale Stärke des Technologie-Roadmapping deutlich: komplizierte Sachverhalte können individuell und trotzdem übersichtlich und leicht greifbar dargestellt werden, was die Grundlage strategischer Diskussionen und Entscheidungen sein sollte.

## Anhang: Leitfaden und Zusammenfassung der Experteninterviews

Diese Studie fußt zu einem großen Teil auf den Einschätzungen von Experten verschiedener Bereiche, die mit dem autonomen Fahren in Verbindung stehen. Dazu wurden auf Grundlage eines semi-strukturierten Leitfadens persönliche und seltener auch telefonische Interviews geführt. Die darin geäußerten Meinungen und Hypothesen wurden schriftlich erfasst und anschließend anonymisiert ausgewertet.

Semi-strukturierte Interviews sind eine Befragungstechnik der qualitativen empirischen Forschung, bei der vorher festgelegte Fragen auch offen beantwortet werden können. Für das Technologie-Roadmapping erscheint diese Befragungsmethode besonders geeignet, weil einerseits eine Vergleichbarkeit zwischen den Expertenmeinungen ermöglicht wird und andererseits auch bisher unbekannte Aspekte diskutiert werden können.

Der Leitfaden, der unserer Befragung zugrunde lag, wird nachfolgend aufgelistet. Das umfassende Interviewmaterial, das im Rahmen der Befragungen entstanden ist, wird darin stark aggregiert und anonymisiert zusammengefasst. Dadurch soll ergänzend zur eigentlichen Studie ein Eindruck darüber vermittelt werden, bei welchen Fragen die Einschätzungen der Experten ähnlich waren und bei welchen Unterschiede bestanden. Zum Ende wurden auch kurze Fragen zu politischen Implikationen gestellt, die aber weniger Gegenstand der eigentlichen Studie waren.

Tabelle 6: Interviewleitfaden

| Einstiegsfragen |                                                                                                                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frage a)        | <i>In welcher Funktion arbeiten Sie für Ihren aktuellen Arbeitgeber?</i>                                                                                            |
|                 | Siehe Abschnitt 1.2                                                                                                                                                 |
| Frage b)        | <i>Inwiefern beschäftigen Sie sich mit dem autonomen Fahren und den damit einhergehenden technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen?</i> |
|                 | Siehe Abschnitt 1.2                                                                                                                                                 |

**Allgemeines**

Frage 1: *Glauben Sie, dass sich das autonome Fahren (in Deutschland) durchsetzen wird?*

Die befragten Experten gingen einheitlich davon aus, dass sich das autonome Fahren in bestimmten Formen in Deutschland durchsetzen wird. Allerdings bestand Uneinigkeit darüber, ob der autonome Betrieb in allen Verkehrsbereichen und unter allen Umweltbedingungen in absehbarer Zeit oder überhaupt umsetzbar ist. Die meisten Experten formulierten hierbei eine eher konservative Haltung: Zwar sei das autonome Fahren unter Testbedingungen schon heute technisch möglich, allerdings blieben der Mischverkehr mit nicht-autonomen Fahrzeugen und die Übergänge zwischen verschiedenen Verkehrsbereichen (Autobahnen, Landstraßen, Wohngebiete, etc.) aus technischer Sicht noch problematisch. Die Komplexität des realen Straßenverkehrs werde häufig unterschätzt und man könne per Definition erst dann vom vollautonomen Fahren sprechen, wenn schlechte Sicht- und Wetterverhältnisse oder die Beschaffenheit der Infrastruktur einer Automation nicht entgegenstehen.

Vereinzelt wurden auch optimistischere Szenarien skizziert, in denen das autonome Fahren in Zukunft ein fester Bestandteil des Verkehrsalltags sein wird. Grundsätzlich werde die Marktdurchsetzung autonomer Fahrzeuge im besonderen Maße auch vom Kundenverhalten, politischen Einflüssen und der allgemeinen Marktdynamik im neuen Wettbewerb der Automobilität abhängen, so die Experten.

Frage 2: *In der internationalen Forschung und Praxis sind die sechs Automatisierungsstufen (0–5) der Society of Automotive Engineers (SAE) verbreitet. Das SAE-Level 2 ist bereits erreicht. Wie ist Ihre Einschätzung zur zeitlichen Realisierbarkeit der SAE-Level 3 bis 5?*

Es bestand ein allgemeiner Konsens darüber, dass in den kommenden Jahren ein sukzessiver Übergang zu SAE-Level 3 erwartet werden könne. Für die SAE-Level 4 und 5 bedürfe es aber eines ungleich größeren technischen Hubs. Die Realisierbarkeit des SAE-Level 4 im Mischverkehr und unter allen Wetter- und Verkehrsbedingungen wird erst zwischen 2040 und 2050 erwartet, so die durchschnittliche Einschätzung der Experten. Das SAE-Level 5 könnte danach aber schon zwischen 2045 und 2055 erreicht sein, weil die technischen Herausforderungen sehr ähnlich seien.

Analog zu Frage 1 wurde vereinzelt auch eine deutlich schnellere Marktdurchsetzung beschrieben. Neue Anbieter wie Tesla oder Waymo könnten als starker Innovationstreiber der gesamten Branche auftreten. Zudem beabsichtigten deren Konzepte, das SAE-Level 3 möglichst schnell zu überspringen. Eine daraus resultierende Marktdynamik dürfte in einer sowohl schnelleren als auch breiteren Markteinführung autonomer Fahrzeuge münden.

Ob die neuen Anbieter mit ihren Marktstrategien erfolgreich sein werden, wurde sehr kontrovers beantwortet. Während sich einige Experten eher skeptisch zeigten, betonten andere die großen Potenziale der neuen Geschäftsansätze. Kommt es aber allgemein zu technischen Problemen, die sogar zu Unfällen führen, könnte sich die weitere Entwicklung verzögern.

Frage 3: *Wie könnte die Markteinführung autonomer Fahrzeuge aus Ihrer Sicht erfolgen?*

Die Markteinführung autonomer Fahrzeuge dürfte schrittweise über immer komplexerer Fahrsicherheits- und Fahrerassistenzsysteme erfolgen, so die Einschätzung der meisten Experten. Bisher hätten die deutschen Automobilhersteller neue Assistenzsysteme eher bedacht eingeführt. Viele neue Anbieter würden hingegen deutlich proaktiver agieren und vor möglichen Fehlfunktionen weniger zurückschrecken. Außerdem sei zwischen verschiedenen Verkehrsträgern und Verkehrsbereichen zu unterscheiden.

Laut einiger Experten werde das autonome Fahren vermutlich zuerst in abgeschlossenen Verkehrsbereichen wie Firmen- oder Messegeländen eingeführt. Dazu zählen z. B. autonome Shuttle-Busse. Auch die bisher noch hohen Anschaffungskosten autonomer Fahrtechnologien sprächen für eine solche kommerzielle Nutzung, bei der sich die Verbraucher mit den neuen Technologien auch vertraut machen könnten. In der privaten Nutzung sei der anfängliche Betrieb auf Autobahnen und Landstraßen wahrscheinlich. Erst später sei mit dem autonomen Fahren in der Stadt zu rechnen.

Frage 4a: *Glauben Sie an ein Zukunftsszenario, bei dem in Deutschland fast ausschließlich autonome Fahrzeuge verkehren?*

Ob es in Deutschland in Zukunft nur noch autonome Fahrzeuge geben wird, hänge von vielen Faktoren ab und könne deshalb kaum eindeutig beantwortet werden, so die Experten. Einige beschrieben ein Szenario, in dem auf gesonderten Fahrspuren oder in bestimmten Verkehrsbereichen nur autonome Fahrzeuge erlaubt sein könnten. Dadurch wäre auch die Problematik des anspruchsvollen Mischverkehrs gelöst. Eine absolut flächendeckende Nutzung autonomer Fahrzeuge stelle ein fernes Zukunftsszenario dar.

Frage 4b: *Welche (gesellschaftlichen) Vor- und Nachteile hätte die breite Marktdurchsetzung des autonomen Fahrens?*

Aus gesellschaftlicher Sicht spreche Vieles für das autonome Fahren, so die Experten. Dazu zählen eine deutliche Verringerung der Unfallzahlen, effizientere Fahrweisen und dadurch geringere Umweltbelastungen, ein geringerer Bedarf an Parkflächen durch autonome Ride-Hailing-Dienste oder der Zugang älterer, körperlich beeinträchtigter und minderjähriger Menschen zu einem bedarfsgerechten Individualverkehr. Im selben Zuge wurden aber auch mehrfach negative Auswirkungen des autonomen Fahrens skizziert. Die beschriebenen Vorteile würden sich kaum von allein einstellen, sondern bedürfen politischer Maßnahmen im Sinne der Anreizgestaltung. Andernfalls würden die erhofften Effekte ins Negative umschlagen, weil das autonome Fahren den Individualverkehr noch attraktiver machen könnte und damit zu größeren Umwelt- und Staubbelastungen führe. Längere Fahrtzeiten würden als deutlich angenehmer empfunden werden, so dass die Hemmschwelle für lange Pendelstrecken sinke. Das autonome Fahren habe vor allem dann große Potenziale, wenn es erfolgreich mit neuen Formen der Fahrzeugnutzung wie dem Ride-Hailing, aber auch neuen Antriebs-techniken wie Elektromotoren verknüpft werde. Das hätte wiederum große Implikationen für den Markt für private Kraftfahrzeuge und damit für die deutsche Automobilindustrie.

## Technologien

Frage 5: *Das autonome Fahren greift sowohl in den Fahrzeugen als auch in der Infrastruktur auf viele verschiedene Technologien zurück. Welche davon sind besonders relevant?*

Insbesondere LiDARs, Videokameras, Ultraschall- und Infrarotsensoren, GPS, eine zentrale Recheneinheit und die Software inklusive einer Künstlichen Intelligenz wurden als für das autonome Fahren relevante Fahrzeugtechnologien genannt. Vereinzelt wurde auch die Bedeutung dynamischer Fahrwerke erwähnt, die z. B. auch in schnelleren Kurvenfahrten ein angenehmes Arbeiten ermöglichen. Zudem wurde mehrfach die Relevanz der infrastrukturellen Technikausstattung beschrieben, worauf die neuen Anbieter aber tendenziell verzichten würden.

Mehrfach wurde die Bedeutung von 5G, dem neuen Datenstandard für Mobilfunk und mobiles Internet, relativiert. Dass auch seriöse Medienberichte von einer Notwendigkeit von 5G für das autonome Fahren sprechen, sei aus technischer Sicht falsch, da für das autonome Fahren als solches der bisherigere Standard ausreiche. Vielmehr könnte 5G die allgemeine Vernetzung des Verkehrs und die Bereitstellung von Unterhaltungsdiensten während der Fahrt begünstigen.

Das Missverständnis der vermeintlichen Notwendigkeit könnte unter anderen darin begründet sein, dass nach profitablen Einsatzfeldern für den 5G-Standard gesucht werde, um dessen hohe Infrastrukturkosten zu rechtfertigen. Unterschiedliche Herangehensweisen etablierter und neuer Anbieter bei der technischen Ausstattung autonomer Fahrzeuge wurden nur vereinzelt angedeutet.

Frage 6a: *Wie ist die deutsche Automobilindustrie Ihrer Meinung nach bei den autonomen Fahrtechnologien aufgestellt?*

Die deutsche Automobilbranche habe eine herausragende Stellung bei vielen der Technologien für das autonome Fahren, so die große Mehrheit der Experten. Das werde sowohl in den Patentanalysen als auch in praxisnahen Projekten deutlich. Die deutsche Automobilindustrie forsche seit vielen Jahren an autonomen Fahrtechnologien. Mit den Erfolgen würden sich die deutschen Automobilhersteller und -zulieferer aber zu meist bedeckt halten und eine eher passive Strategie verfolgen.

Gleichwohl wurde mehrfach argumentiert, dass die Quantität der Patente und damit auch die bisherigen Entwicklungsvorsprünge nur ein schwacher Indikator für den späteren Erfolg der Unternehmen sei, wie schon andere Technologieentwicklungen unter Beweis gestellt hätten. Es würde insbesondere auch auf die Marktfähigkeit der Produkte und die erfolgreiche Adaption neuer Markttrends ankommen.

Frage 6b: *Wo gibt es Nachholbedarfe?*

Bei den autonomen Fahrtechnologien gebe es für die deutsche Automobilindustrie kaum Nachholbedarfe, so die Experten.



### Geschäftsmodelle

Frage 7: *Welche neuen Geschäftsmodelle könnten durch das autonome Autofahren entstehen?*

Auf der Seite der Fahrdienstleistungen wurden hauptsächlich Free-floating Ride-Hailing- und Ride-Pooling-Dienste genannt, wobei es auch einige Mischformen geben dürfte. Hinzu kommen neue Unterhaltungs- und Servicedienstleistungen während der Fahrt, die ein großes Geschäftspotenzial haben und die bisherigen Gewinnpotenziale in der Automobilindustrie deutlich erhöhen könnten. Im Bereich der Unterhaltungselektronik sind damit beispielsweise TV- und Streamingdienste, Computerspiele, soziale Medien oder Shopping-Angebote gemeint.

Darüber hinaus könnten auch Arbeitsumgebungen geschaffen werden, die entsprechende Dienstleistungen wie Videotelefonie und Cloud-Lösungen implizieren würden.

Frage 8a: *Kann die deutsche Automobilindustrie die neuen Geschäftsmodelle erfolgreich umsetzen?*

In den Befragungen wurde mehrfach betont, dass sich die deutschen Automobilhersteller sowohl beim autonomen Fahren als auch bei anderen Zukunftsthemen zunehmend engagierter zeigten. Allerdings sei die Konkurrenz durch Technologieunternehmen und die wachsende Anzahl der Fahrdienstleister sehr groß. Insbesondere die Bereitstellung von Fahrdienstleistungen und Mehrwertdiensten während der Fahrt erfordere Kompetenzen, die über das bisherige Kerngeschäft der etablierten Anbieter hinausginge. Die damit einhergehenden Herausforderungen seien für die Automobilhersteller ohne Kooperationen mit anderen Unternehmen kaum zu bewältigen.

Frage 8b: *Wo gibt es Nachholbedarfe?*

Mehrfach wurde die Expertise in der Informations- und Datenverarbeitung als größter Nachholbedarf beschrieben. Das betrifft insbesondere die Entwicklung Künstlicher Intelligenzen und geeigneter Plattformen, über die Mehrwertdienste während der Fahrt bereitgestellt werden können. Um vom späteren Markt für Fahrdienstleistungen und dem für Mehrwertdienste profitieren zu können, müssten sich die Automobilhersteller schon heute entsprechend positionieren. Es sei richtig, sowohl neue Fahrfunktionen als auch neue Geschäftsfelder mit Bedacht einzuführen. Nichtsdestoweniger sei ein offeneres und mutigeres Vorgehen als bisher erforderlich.

Frage 9: *Wird der Markt für private Fahrzeuge in Zukunft an Bedeutung verlieren?*

Einige Studien sprechen dafür, dass der Markt für private Fahrzeuge in Zukunft an Bedeutung verlieren könnte. Gleichzeitig bliebe aber der große Erfolg von Carsharing-Anbietern bisher aus. Viele hätten mit Finanzierungsproblemen zu kämpfen. Häufig werde der Instandhaltungsaufwand einer kommerziellen Fahrzeugflotte unterschätzt, so einige der Experten. Das würde in Zukunft auch autonome Ride-Hailing- und Ride-Pooling-Dienste betreffen, deren Fahrzeuge laufend gewartet und sauber gehalten werden müssen. Der Erfolg neuerer Fahrdienstleistungen und damit auch die Bedeutung des Marktes für private Fahrzeuge hänge vor allem vom politischen Rahmen ab, so viele der Experten.

| <b>Wettbewerb</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frage 10a:        | <p><i>Welche Anbieter könnten durch die neuen Geschäftsmodelle in den Markt kommen?</i></p> <p>Die Experten haben drei verschiedene Arten neuer Anbieter als neue Konkurrenz im Automarkt benannt. Das sind zum ersten neue Fahrzeughersteller wie Tesla, BYD oder Byton; zum zweiten neue Fahrdienstleister wie Uber, Lyft und viele weitere lokale Anbieter; und zum dritten die großen Technologieunternehmen wie Google, Amazon, Apple, Facebook oder Baidu. Im Markt für Mehrwertdienste während der Fahrt dürften auch Unterhaltungsdienstleister hinzukommen. Grundsätzlich öffne sich der Markt für Automobilität in viele Richtungen, so die Experten.</p>                                                                         |
| Frage 10b:        | <p><i>Welche Stärken haben diese gegenüber der deutschen Automobilindustrie?</i></p> <p>Viele der Experten beschrieben die Vorteile der neuen Anbieter vor allem in ihrer Expertise in der Informations- und Datenverarbeitung und die Möglichkeit, als Neulinge in der Autobranche nicht an bisherige Konzepte gebunden zu sein. Für sie stelle sich nicht die Frage nach einer unternehmerischen Umstrukturierung. Häufig würden auch Tochtergesellschaften gegründet, die ausschließlich auf das autonome Fahren oder die Bereitstellung von Fahrdienstleistungen ausgerichtet sind. Die Projekte der etablierten Hersteller seien häufig zu sehr an das Kerngeschäft mit konventionellen Fahrzeugen und Geschäftsmodellen gebunden.</p> |

Frage 11: *Was sind Ihre konkreten Handlungsempfehlungen an die deutsche Automobilindustrie?*

Als erste konkrete Handlungsempfehlung wurden mehrfach noch umfassendere Kooperationen mit anderen Unternehmen genannt. So habe die deutsche Automobilindustrie die Chance, die eigene Marktstellung zu schützen oder sogar auszubauen. Außerdem wurde die Ausgliederung des autonomen Fahrens und damit verbundener Dienste in neue Tochtergesellschaften empfohlen. Die Erprobung neuer Geschäftsfelder sei häufig zu stark eingeschränkt, weil entsprechende Projekte immer Rechenschaft gegenüber dem gesamten Unternehmen ablegen müssten. Ohnehin seien die etablierten Hersteller damit konfrontiert, ein Gleichgewicht zwischen den bisher noch sehr profitablen Geschäften mit konventionellen Fahrzeugen und den großen Zukunftsthemen zu schaffen. Das könne man durch Ausgliederungen deutlich abmildern.

#### **Politik**

Frage 12a: *Unterstützt die deutsche Politik die Entwicklung autonomer Fahrzeuge ausreichend?*

Viele der Experten betonten, dass die derzeitige Politik das autonome Fahren und andere automobilen Themen durchaus unterstütze. Allerdings mangle es oft an übergeordneten Strategien. Finanzielle Unterstützung und regulatorische Maßnahmen würden mit häufig hohem bürokratischen Aufwand umgesetzt, was auch in der föderalistischen Aufteilung in Bund und Länder begründet sei.

Frage 12b: *Was sind Ihre politischen Handlungsempfehlungen, um den Automobilstandort Deutschland zu sichern?*

Einige Experten sprachen sich für deutlich zielgerichtetere Forschungs- und Praxisinvestitionen als bisher aus. Das impliziere eine übergeordnete Agenda, die sich nicht nur an einzelnen Legislaturperioden von Bund und Ländern orientiert.

Frage 13: *Werden aus Ihrer Erfahrung von Seiten der Politik Aspekte der Verkehrssicherheit, des Umweltschutzes und der Reduzierung der Verkehrsbelastungen im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren kommuniziert?*

Aus der Sicht einiger Experten werde das autonome Fahren in der Politik nur aus industriepolitischer Sicht betrachtet. Gesellschaftliche Implikationen würden kaum bis gar nicht kommuniziert. So kämen in den allermeisten Forschungsausschreibungen die Themen Umweltschutz oder Gesundheit gar nicht vor. Das gelte sowohl für das autonome Fahren als auch für andere Verkehrsthemen.

## Literatur

- ABI Research (2017): V2X and Cooperative Mobility Use Cases, <https://www.abiresearch.com/press/abi-research-sees-v2x-tech-gaining-momentum-automo/> (Abruf am 10.9.2019).
- ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club) (2018a): Autonomes Fahren: Die 5 Stufen zum selbstfahrenden Auto, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autonomes-fahren/grundlagen/autonomes-fahren-5-stufen/> (Abruf am 08.07.2020).
- ADAC (2018b): Platooning als virtuelle Deichsel: Lkw bald ohne Fahrer?, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autonomes-fahren/technik-vernetzung/platooning-lkw-automatisiert/> (Abruf am 08.07.2020).
- Ahlswede, A. (2019a): Anzahl registrierter Carsharing-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/324692/umfrage/carsharing-nutzer-in-deutschland/> (Abruf am 08.07.2020).
- Ahlswede, A. (2019b): Statistiken zur Automobilindustrie Deutschland, [https://de.statista.com/themen/1346/automobilindustrie/#dossierSummary\\_chapter2](https://de.statista.com/themen/1346/automobilindustrie/#dossierSummary_chapter2) (Abruf am 08.07.2020).
- Ahlswede, A. (2019c): Bruttowertschöpfung der deutschen Automobilindustrie in den Jahren 2008 bis 2017, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/290075/umfrage/bruttowertschoepfung-der-deutschen-automobilindustrie/> (Abruf am 08.07.2020).
- Ahlswede, A. (2019d): Exportquote der Automobilindustrie in Deutschland im Zeitraum der Jahre 2005 bis 2018, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/192078/umfrage/exportquote-der-automobilindustrie-in-deutschland/> (Abruf am 08.07.2020).
- Albrecht, A. J. (1979): Measuring Application Development Productivity. In: Proceedings of IBM Application Development Symposium, S. 83–92.
- Amadi-Echendu, J.; Lephauphau, O.; Maswanganyi, M.; Mkhize, M. (2011): Case studies of technology roadmapping in mining. In: Journal of Engineering and Technology Management 28 (1–2), S. 23–32.
- Amer, M.; Daim, T. U. (2010): Application of technology roadmaps for renewable energy sector. In: Technological Forecasting and Social Change 77 (8), S. 1355–1370.

- An, Y.; Lee, S.; Park, Y. (2008): Development of an integrated product-service roadmap with QFD. In: International Journal of Service Industry Management 19 (5), 621–638.
- Apple (2012): Investor Relations. Annual Report 2012.
- Apple (2018): Investor Relations. Annual Report 2018.
- Aral (2015): Trends beim Autokauf 2015, <http://docplayer.org/5517826-Www-aral-de-aral-studie-trends-beim-autokauf-2015-aral-aktiengesellschaft-marktforschung.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Audi (2014): Audi – Pilotiertes Fahren, <https://www.audi-mediacycenter.com/de/audiomediacycenter/video/audi-pilotiertes-fahren-2382> (Abruf am 08.07.2020).
- Audi (2019): Algorithmen, die das Rennen machen, <https://www.audi.com/de/experience-audi/mobility-and-trends/autonomous-driving/roborace.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Bansal, P.; Kockelman, K. M. (2017): Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 95, S. 49–63.
- Bardt, H. (2016): Autonomes Fahren. Eine Herausforderung für die deutsche Autoindustrie. In: Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung 43 (2).
- Bardt, H. (2017): Deutschland hält Führungsrolle bei Patenten für autonome Autos. In: IW-Kurzberichte, Institut der deutschen Wirtschaft Köln, S. 1–3.
- Barker, D.; Smith, D. J. H. (1995): Technology foresight using roadmaps. In: Long Range Planning 28 (2), S. 21–28.
- BAST – Bundesanstalt für Straßenwesen (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung (Forschung kompakt), [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Publikationen/Foko/Downloads/2017-2010/2012-11.pdf?blob=publicationFile&v=1](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Foko/Downloads/2017-2010/2012-11.pdf?blob=publicationFile&v=1) (Abruf am 08.07.2020).
- Becker, D.; Pawelke, M.; Schalk, P.; Feege, A.; Bergmann, U. (2018): KPMG's 19th consecutive Global Automotive Executive Survey 2018, <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/tr/pdf/2018/03/global-automotive-executive-survey-2018.pdf> (Abruf am 08.07.2020).
- Beiker, S.; Hansson, F.; Suneson, A.; Uhl, M. (2016): How the convergence of automotive and tech will create a new ecosystem, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-the-convergence-of-automotive-and-tech-will-create-a-new-ecosystem> (Abruf am 08.07.2020).

- Bernhart, W.; Olschewski, I.; Burkard, C.; Galander, S. (2016): Index „Automatisierte Fahrzeuge“. 1. Quartal 2016, <https://www.fka.de/images/publikationen/2016/index-automated-vehicle-2016-q1-d.pdf>, (Abruf am 08.07.2020).
- Berret, M.; Bernhart, W.; Winterhoff, M.; Seyger, R.; Kirstetter, E.; Riederle, S. (2017): Automotive Disruption Radar (1), <https://www.rolandberger.com/en/Publications/Automotive-Disruption-Radar.html> (Abruf am 08.07.2020)
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2019): 5G-Innovationsprogramm startet, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/5g-mobilfunk-zukunft.html> (Abruf am 08.07.2020).
- BMW (2019): Autonomous driving: Digital measuring of the world, <https://www.bmw.com/en/innovation/mapping.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Branscomb, L. M. (Hrsg.) (1993): Empowering Technology: Implementing a U.S. Strategy: The MIT Press.
- Bray, O. H.; Garcia, M. L. (1997): Technology roadmapping: the integration of strategic and technology planning for competitiveness. Portland International Center for Management of Engineering and Technology – PICMET (Hrsg.).
- BSI (Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik) (2018): Redundanz, Modularität, Skalierbarkeit, [https://bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Sicherheitsberatung/Redundanz-Modularitaet-Skalierbarkeit/redundanz-modularitaet-skalierbarkeit.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Sicherheitsberatung/Redundanz-Modularitaet-Skalierbarkeit/redundanz-modularitaet-skalierbarkeit.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (Abruf am 08.07.2020).
- Bundesverband Carsharing (2019a): Unterschiede free-floating & stationsbasiertes CarSharing, <https://carsharing.de/presse/fotos/zahlen-daten/unterschiede-free-floating-stationsbasiertes-carsharing>, (Abruf am 08.07.2020).
- Bundesverband Carsharing (2019b): Anzahl CarSharing-Fahrzeuge und CarSharing-Kunden, <https://carsharing.de/presse/fotos/zahlen-daten/anzahl-carsharing-fahrzeuge-carsharing-kunden> (Abruf am 08.07.2020).
- Burns, L. D.; Jordan, W. C.; Scarborough, B. A. (2012): Transforming personal mobility, <http://wordpress.ei.columbia.edu/mobility/files/2012/12/Transforming-Personal-Mobility-Aug-10-2012.pdf>, (Abruf am 08.07.2020).



- Cadillac (2017): V2V Safety Technology Now Standard on Cadillac CTS Sedans,  
<https://media.cadillac.com/media/us/en/cadillac/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2017/mar/0309-v2v.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Caetano, M.; Amaral, D. C. (2011): Roadmapping for Technology Push and Partnership. A Contribution for Open Innovation Environments. In: Technovation 31, S. 320–355.
- Carr, A. (2012): J. Crew CEO, Apple board member Mickey Drexler reveals Steve Jobs' iCar dream, confirms „Living Room“ plans,  
<https://www.fastcompany.com/1837636/j-crew-ceo-apple-board-member-mickey-drexler-reveals-steve-jobs-icar-dream-confirms-living-r> (Abruf am 08.07.2020).
- Carvalho, M. M.; Fleury, A., Lopes, A. P. (2013): An overview of the literature on technology-roadmapping (TRM): Contributions and trends. In: Technological Forecasting & Social Change 80, S. 1418–1437.
- Charniga, J. (2017): GM, Michigan look ahead with V2I technology development,  
<https://www.autonews.com/article/20170530/MOBILITY/170539982/gm-michigan-look-ahead-with-v2i-technology-development> (Abruf am 08.07.2020).
- Chen, T. D.; Kockelman, K. M.; Hanna, J. P. (2016): Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet. Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 94, S. 243–254.
- Choi, S.; Kim, H.; Yoon, J.; Kim, K.; Lee, J. Y. (2013): An SAO-based text-mining approach for technology roadmapping using patent information. In: R&D Manage 43 (1), S. 52–74.
- Continental (2013): Mobilitätsstudie 2013. Ergebnisse zur Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen und automatisiertem Fahren,  
<https://www.continental.com/resource/blob/12762/1ab71f91b3ae8246a404ae2562eef976/mobilitaetsstudie-2013-data.pdf> (Abruf am 08.07.2020).
- Daim, T. U.; Oliver, T. (2008): Implementing technology roadmap process in the energy services sector: A case study of a government agency. In: Technological Forecasting and Social Change 75 (5), S. 687–720.
- Daimler (2018): Automated driving made easy,  
<https://www.daimler.com/magazine/technology-innovation/automation-daimler-immendingen-camera-radar-lidar.html> (Abruf am 08.07.2020).

- Dams, J.; Exner, U.; Vetter, P. (2019): Elektromobilität kostet bis 2030 fast 125.000 Jobs,  
<https://www.welt.de/wirtschaft/article201106910/Autoindustrie-Elektromobilitaet-kostet-bis-2030-fast-125-000-Jobs.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Daugherty, B. (2017): DSRC or 5G? #innovationandimpact. Innovation&IMPACT Symposium 2017,  
[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=14&v=bw8xrQKoX8Q](https://www.youtube.com/watch?time_continue=14&v=bw8xrQKoX8Q) (Abruf am 08.07.2020).
- Davies, A. (2018): Luminar's New Lidar Could Bring Vision to Every Robocar in the World, <https://www.wired.com/story/luminar-lidar-self-driving-cars/> (Abruf am 08.07.2020).
- Dellenback, S. (2013): Director, Intelligent Systems Department, Automation and Data Division, Southwest Research Institute. E-Mail-Korrespondenz mit Fagnant, D.J., und Kockelman, K. M., 26.5.2013.
- DeStatis (2019): Wirtschaft: Außenhandel,  
[https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/_inhalt.html) (Abruf am 08.07.2020).
- DPMA (Deutsches Patent- und Markenamt) (2019): Autonomes Fahren: Zahlen und Fakten,  
[https://www.dpma.de/docs/presse/infografiken\\_autonomes\\_fahren.pdf](https://www.dpma.de/docs/presse/infografiken_autonomes_fahren.pdf) (Abruf am 08.07.2020).
- DiDi Labs (2019): DiDi Labs. Transforming how people reach their destinations, <http://www.didi-labs.com/?jobs=active> (Abruf am 08.07.2020).
- Donnelly, K.; Beckett-Furnell, Z.; Traeger, S.; Okrasinski, T.; Holman, S. (2006): Eco-design implemented through a product-based environmental management system. In: Journal of Cleaner Production 14 (15–16), S. 1357–1367.
- Dudenhöffer, Ferdinand (2014): Deutsche Autobauer dominieren Premiumgeschäft. In. GAK – Gummi, Fasern Kunststoffe 67 (4), S. 200–202.
- Dumitrescu, R.; Gausemeier, J.; Slusallek, P.; Cieslik, S.; Demme, G.; Falkowski, T.; Hoffmann, H.; Kadner, S.; Reinhart, F.; Westermann, T.; Winter, J. (2018): Studie „Autonome Systeme“. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 13–2018.
- Dungs, J.; Duwe, D.; Herrmann, F.; Schmidt, A.; Stegmüller, S.; Gaydoul, R.; Peters, L. P.; Sohl, M. (2016): „The Value of Time“. Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren,  
[https://blog.iao.fraunhofer.de/images/blog/studie-value\\_of\\_time.pdf](https://blog.iao.fraunhofer.de/images/blog/studie-value_of_time.pdf) (Abruf am 08.07.2020).

- DW (Deutsche Welle) (2019): Running on empty – Will Germany's car industry survive?, <https://www.dw.com/en/running-on-empty-will-germanys-car-industry-survive/av-50264793> (Abruf am 08.07.2020).
- Eisert, R. (2016): Robo-Taxis überholen 2030 Autobauer beim Gewinn, <https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/selbstfahrende-autos-robo-taxis-ueberholen-2030-autobauer-beim-gewinn/13350404.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Elliott, J. (2005): Biometrics roadmap for police applications. In: BT Technology Journal 23 (4), S. 37–44.
- Eppler, M. J.; Platts, K. W. (2009): Visual Strategizing: The Systematic Use of Visualization in the Strategic-Planning Process. In: Long Range Planning 42 (1), S. 42–74.
- Ernst & Young (2013): Autonomes Fahren – die Zukunft des PKW-Marktes? Was Autofahrer von Fahrzeugen mit Autopilot halten und wie sie über Fahrer-Assistenz-systeme denken. Eschborn: Ernst & Young.
- EIRMA (European Industrial Research Management Association) (1997): Technology roadmapping: delivering business vision. Working group reports (52). Paris.
- Fenn, Jackie (1995): The Microsoft System Software Hype Cycle Strikes Again. Bericht.
- Fenwick, D.; Daim, T. U.; Gerdts, N. (2009): Value Driven Technology Road Mapping (VTRM) process integrating decision making and marketing tools: Case of Internet security technologies. In: Technological Forecasting and Social Change 76 (8), S. 1055–1077.
- Fitzpatrick, A. (2015): Apple Reportedly Hiring for Mystery Car Project, <https://time.com/3709763/apple-car-lab/> (Abruf am 08.07.2020).
- Focus2Move (2019): Global Data & Ranking, <https://focus2move.com/> (Abruf am 08.07.2020).
- Ford (2020): Park-Assistent mit Ein- und Ausparkfunktion, <https://www.ford.de/kaufberatung/informieren/technologien/fahrerlebniss/park-assistent-mit-ein-und-ausparkfunktion> (Abruf am 08.07.2020).
- Fraunhofer IMS (Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS) (2019): LiDAR. Kompetenzen zum Thema LiDAR am Fraunhofer IMS: CSPAD Detektoren, Signalverarbeitung, Systementwicklung und -simulation, [https://www.ims.fraunhofer.de/de/Geschaeftsfelder/CMOS\\_Image\\_Sensors/Technologien/LiDAR.html](https://www.ims.fraunhofer.de/de/Geschaeftsfelder/CMOS_Image_Sensors/Technologien/LiDAR.html) (Abruf am 08.07.2020).

- Freitag, M. (2019): Volkswagens Roboauto-Chef im Interview: „Bislang waren fast alle Prognosen zu optimistisch“, <https://www.manager-magazin.de/premium/volkswagen-thomas-sedran-bremst-roboauto-erwartungen-a-f5681aa2-0371-4b7b-9758-a01667c72c3b>, (Abruf am 08.07.2020).
- Gallagher, D. (2015): What Apple is driving at, <https://www.wsj.com/articles/what-apple-is-driving-at-heard-on-the-street-1424206410>, (Abruf am 08.07.2020).
- Gandia, R. M.; Antonialli, F.; Cavazza, B. H.; Neto, A. M.; Alves de Lima, D.; Sugano, J. Y.; Nicolai, I.; Zambalde, A. L. (2018): Autonomous vehicles. Scientometric and bibliometric review. In: Transport Reviews 137 (44), S. 1–20.
- Garcia, M. L.; Bray, O. H. (1997): Fundamentals of Technology Roadmapping. Strategic Business Development Department. Sandia National Laboratories, <http://www.acqnotes.com/Attachments/Fundamentals%20of%20Technology%20Roadmapping.pdf> (Abruf am 08.07.2020).
- Gartner (2017): Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017, <https://www.gartner.com/en/documents/3768572/hype-cycle-for-emerging-technologies-2017> (Abruf am 08.07.2020).
- Gartner (2018a): Understanding Gartner’s Hype Cycles, <https://www.gartner.com/en/documents/3887767/understanding-gartner-s-hype-cycles> (Abruf am 08.07.2020).
- Gartner (2018b): Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018, [https://blogs.gartner.com/smarterwithgartner/files/2018/08/PR\\_49086\\_6\\_5\\_Trends\\_in\\_the\\_Emerging\\_Tech\\_Hype\\_Cycle\\_2018\\_Hype\\_Cycle.png](https://blogs.gartner.com/smarterwithgartner/files/2018/08/PR_49086_6_5_Trends_in_the_Emerging_Tech_Hype_Cycle_2018_Hype_Cycle.png), (Abruf am 08.07.2020).
- Gerdri, N.; Vatananan, R. S.; Dansamasatid, S. (2009): Dealing with the dynamics of technology roadmapping implementation: A case study. In: Technological Forecasting and Social Change 76 (1), S. 50–60.
- Gerhold, L.; Holtmannspötter, D.; Neumann, C.; Schüll, E.; Schulz-Montag, B.; Steinmüller, K.; Zweck, A. (Hrsg.) (2015): Standards und Gütekriterien der Zukunftsforschung. Springer Fachmedien. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Geschka, H.; Schauffele, J.; Zimmer, C. (2017): Explorative Technologie-Roadmaps – Eine Methodik zur Erkundung technologischer Entwicklungslinien und Potenziale. In: Martin G. Möhrle und Ralf Isenmann (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 4. Auflage, Springer, S. 83–102.

- Government of Canada (2006): Technology Roadmaps, <https://www.nrcan.gc.ca/energy/offices-labs/canmet/5765> (Abruf am 08.07.2020).
- Groenveld, P. (1997): Roadmapping integrates business and technology. In: Research-Technology Management 40 (5), S. 48–55.
- Groenveld, P. (2007): Roadmapping Integrates Business and Technology. Research-Technology Management 50 (6), S. 49–58.
- Groß, M. (2011): Integriertes Technologie-Roadmapping (iTR). Wie kleine und mittlere Automobilzulieferer nachhaltig Zukunft gestalten können, VDM Verlag.
- Grossman, D. S. (2004): Putting Technology on the Road. In: Research Technology Management 47 (2), S. 41–46.
- Haboucha, C. J.; Ishaq, R.; Shiftan, Y. (2017). User preferences regarding autonomous vehicles. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 78, S. 37–49.
- Hars, A. (2014): Flotten selbstfahrender Elektrotaxis – Eine Szenarioanalyse. In: Proff, H. (Hrsg): Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, S. 615–632.
- Hasse, F.; Jahn, M.; Ries, J. N.; Wilkens, M.; Barthelmess, A.; Heinrichs, D.; Goletz, M. (2017): Digital mobil in Deutschlands Städten, <https://www.pwc.de/de/offentliche-unternehmen/mobilitaetsstudie-2017.pdf>, (Abruf am 08.07.2020).
- Heineke, K.; Kampshoff, P.; Mkrtchyan, A.; Shao, E. (2017): Self-driving car technology: When will the robots hit the road?, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/self-driving-car-technology-when-will-the-robots-hit-the-road> (Abruf am 08.07.2020).
- Hendzlik, M.; Lange, M.; Burger, A.; Dziekan, K.; Fechter, A.; Frey, K.; Lambrecht, M.; Mönch, L.; Schmied, M. (2019): Kein Grund zur Lücke. So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/19-12-03\\_uba\\_pos\\_kein\\_grund\\_zur\\_lucke\\_bf\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/19-12-03_uba_pos_kein_grund_zur_lucke_bf_0.pdf) (Abruf am 08.07.2020).
- HERE (2019): HERE Map Data, <https://www.here.com/products/mapping/map-data> (Abruf am 08.07.2020).

- Herrmann, A. (2019): Es braucht einen Masterplan für das autonome Fahren, keine 5G-Diskussion, [https://www.focus.de/digital/dldaily/gastbeitrag-von-es-braucht-einen-masterplan-fuer-das-autonome-fahren-keine-5g-diskussion\\_id\\_10999799.html](https://www.focus.de/digital/dldaily/gastbeitrag-von-es-braucht-einen-masterplan-fuer-das-autonome-fahren-keine-5g-diskussion_id_10999799.html) (Abruf am 08.07.2020).
- Heß, A; Polst, S. (2017): Mobilität und Digitalisierung: Vier Zukunftsszenarien. Gütersloh: Bertelsmann Stiftung, [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Studie\\_LK\\_Mobilitaet-und-Digitalisierung\\_Vier-Zukunftsszenarien\\_2017.pdf](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Studie_LK_Mobilitaet-und-Digitalisierung_Vier-Zukunftsszenarien_2017.pdf) (Abruf am 08.07.2020).
- Heymann, E.; Koppel, O.; Puls, T. (2013): Evolution statt Revolution – die Zukunft der Elektromobilität. In: Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln 84, S. 1–110.
- Janai, J.; Güney, F.; Behl, A.; Geiger, A. (2017): Computer Vision for Autonomous Vehicles: Problems, Datasets and State-of-the-Art, <https://arxiv.org/pdf/1704.05519.pdf> (Abruf am 99.2019).
- Jaruzelski, B.; Chwalik, R.; Goehle, B. (2018): What the top innovators get right. With careful attention to six key areas, companies can make the most of their R&D investment and outpace the competition, <https://www.strategy-business.com/feature/What-the-Top-Innovators-Get-Right?gko=e7cf9> (Abruf am 08.07.2020).
- Jin, G.; Jeong, Y., Yoon, B. (2015): Technology-driven roadmaps for identifying new product/market opportunities: Use of text mining and quality function deployment. In: Advanced Engineering Informatics 29, S. 126–138.
- Kani, J.; Bourgart, F.; Cui, A.; Rafel, A.; Campbell, M.; Davey, R.; Rodrigues, S. (2009): Next-generation PON-part I: Technology roadmap and general requirements. In: IEEE Communications Magazine 47 (11), S. 43–49.
- Kelly, M. J.; Boulton, W. R.; Kukowski, J. A.; Meieran, E. S.; Pecht, M.; Peeples, J. W.; Tummala, R. R. (1995): Electronic manufacturing and packaging in Japan. In: JTEC Panel Report.
- Kesse, S.; Bernhart, W.; Dressler, N.; Baum, M.; Rentzsch, W. (2016): Automated Trucks. The next big disruptor in the automotive industry?, [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_automated\\_trucks\\_20160517.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_automated_trucks_20160517.pdf) (Abruf am 08.07.2020).
- Kirchain, R.; Kimerling, L. (2007): A roadmap for nanophotonics. In: Nature Photonics 1 (6), S. 303–305.
- Kleber, V. (2018): Wettlauf bei 5G – Wie der künftige Mobilfunkstandard autonomes Fahren revolutionieren wird. Video: Tagesschau, <https://www.tagesschau.de/multimedia/video/video-443209.html> (Abruf am 08.07.2020).

- Koppel, O.; Puls, T.; Röben, E. (2018): Die Patentleistung der deutschen KFZ-Unternehmen. Eine Analyse der Patentanmeldungen beim deutschen Patent- und Markenamt unter Berücksichtigung von branchen- und technologiespezifischen Schwerpunkten. IW-Report 34/18, 1–27,  
[https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/Report/PDF/2018/IW-Report\\_2018-34\\_Patente\\_der\\_Kraftfahrzeugindustrie.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2018/IW-Report_2018-34_Patente_der_Kraftfahrzeugindustrie.pdf)  
 (Abruf am 08.07.2020).
- Kostoff, R. N.; Schaller, R. R. (2001): Science and technology roadmaps. In: IEEE Transactions on Engineering Management 48 (2), S. 132–143.
- Kostoff, R. N.; Boylan, R.; Simons, G. R. (2004): Disruptive technology roadmaps. In: Technological Forecasting and Social Change 71 (1–2), S. 141–159.
- Krafcik, John (2018): Are We There Yet? WSJ D. Live Tech conference. Video. Laguna Beach, Kalifornien,  
<https://www.wsj.com/video/events/are-we-there-yet/D91025CA-9E17-4394-8130-24E9EEB179C5.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Krueger, R.; Rashidi, T. H.; Rose, J. M. (2016): Preferences for shared autonomous vehicles. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 69, S. 343–355.
- Kyriakidis, M.; Happee, R.; Winter, J.C.F. de (2015): Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 32, S. 127–140.
- Lee, David (2018): Apple self-driving car in minor crash,  
<https://www.bbc.com/news/technology-45380373> (Abruf am 08.07.2020).
- Lee, S.; Park, Y. (2005): Customization of technology roadmaps according to roadmapping purposes: Overall process and detailed modules. In: Technological Forecasting and Social Change 72 (5), S. 567–583.
- Lee, S.; Kang, S.; Park, Y.; Park, Y. (2007): Technology roadmapping for R&D planning: The case of the Korean parts and materials industry. In: Technovation 27 (8), S. 433–445.
- Lee, S.; Lee, S.; Seol, H.; Park, Y. (2008): Using patent information for designing new product and technology: keyword based technology roadmapping. In: R&D Management 38 (2), S. 169–188.
- Lee, C.; Song, B.; Cho, Y.; Park, Y. (2010): A Bayesian belief network approach to operationalization of multi-scenario technology roadmap. Portland International Conference on Management and Engineering and Technology (PICMET), Phuket, S. 18–22.



- Lee, S.; Yoon, B.; Lee, C.; Park, J. (2009): Business planning based on technological capabilities: Patent analysis for technology-driven roadmapping. In: Technological Forecasting and Social Change 76 (6), S. 769–786.
- Lexikon der Physik (1998a): Radar, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/radar/11970> (Abruf am 08.07.2020).
- Lexikon der Physik (1998b): Infrarot, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/infrarot/7242> (Abruf am 08.07.2020).
- Lexikon der Physik (1998c): Ultraschall, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/ultraschall/14891> (Abruf am 08.07.2020).
- Lexikon der Physik (1998d): LIDAR, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/lidar/9033> (Abruf am 08.07.2020).
- Lichtenthaler, U. (2008): Integrated Roadmaps for Open Innovation. In: Research-Technology Management 51 (3), S. 45–49.
- Luminar (2019): We take the guesswork out of autonomy, <https://www.luminartech.com/technology> (Abruf am 08.07.2020).
- Lyft (2019): We can change transportation together, <https://self-driving.lyft.com/> (Abruf am 08.07.2020).
- Ma, T.; Liu, S.; Nakamori, Y. (2006): Roadmapping as a way of knowledge management for supporting scientific research in academia. In: Systems Research and Behavioral Science 23 (6), S. 743–755.
- Macintosh, A.; Filby, I.; Tate, A. (1998): Knowledge Asset Road Maps. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Practical Aspects of Knowledge Management (PAKM98), 17.1–17.4.
- Martin, H.; Daim, T. (2008): Technology roadmapping through intelligence analysis: case of nanotechnology. In: International Journal of Society Systems Science 1 (1), S. 49–66.
- McCabe, T. J. (1976): A Complexity Measure. In: IEEE Transactions on Software Engineering 2 (4), <http://www.literateprogramming.com/mccabe.pdf> (Abruf am 08.07.2020).
- McCandless, D.; Doughty-White, P.; Quick, M. (2015): Codebases. Millions of lines of code, <https://informationisbeautiful.net/visualizations/million-lines-of-code/> (Abruf am 08.07.2020).
- McConnell, Steve (2004): Code Complete: A Practical Handbook of Software Collection. 2. Auflage, Microsoft Press.



- McDowall, W. (2012): Technology roadmaps for transition management: The case of hydrogen energy. In: *Technological Forecasting and Social Change* 79 (3), S. 530–542.
- McMillan, A. (2003): Roadmapping—Agent of Change. In: *Research-Technology Management* 46 (2), S. 40–47.
- Mills, J.; Neely, A.; Platts, K.; Gregory, M.; Richards, H. (1994): Strategy evolution: incorporating time in the manufacturing strategy process. In: *Proceedings of the 1st Conference of European Operations Management Association*, S. 235–240.
- Mitchell, R.; Phaal, R.; Athanassopoulou, N. (2018): Scoring methods for evaluating and selecting early stage technology and innovation projects. In: *Centre for Technology Management working paper series 2*, S. 1–19.
- Mohr, D.; Kaas, H.-W.; Gao, P.; Wee, D.; Möller, T. (2016): Automotive revolution – perspective towards 2030. How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry. McKinsey & Company. *Advanced Industries* January 2016, S. 1–20, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/disruptive-trends-that-will-transform-the-auto-industry> (Abruf am 08.07.2020).
- Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.) (2017): *Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. VDI. 4. Auflage, Springer Verlag.
- Mosquet, X.; Dauner, T.; Lang, N.; Rüßmann, M.; Mei-Pochtler, A.; Agrawal, R.; Schmieg, F. (2015): Revolution in the Driver's Seat. The Road to Autonomous Vehicles, [http://image-src.bcg.com/Images/BCG-Revolution-in-the-Drivers-Seat-Apr-2015\\_tcm9-64351.pdf](http://image-src.bcg.com/Images/BCG-Revolution-in-the-Drivers-Seat-Apr-2015_tcm9-64351.pdf) (Abruf am 08.07.2020).
- Müller, S.; Böhm, M.; Schröer, M.; Bakhirev, A.; Baiasu, B.-C.; Krcmar, H.; Welp, I. M. (2016): *Geschäftsmodelle in der digitalen Wirtschaft. Studien zum deutschen Innovationssystem* Nr. 13-2016.
- NASA (1998): *NASA Technology Plan 1998*.
- Nordrum, A.; Clark, K. (2017): 5G Bytes: Millimeter Waves Explained. High-frequency millimeter waves will greatly increase wireless capacity and speeds for future 5G networks, <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/5g-bytes-millimeter-waves-explained> (Abruf am 08.07.2020).
- Nvidia (2019): Nvidia Drive AGX, <https://www.nvidia.com/de-de/self-driving-cars/drive-platform/hardware/> (Abruf am 08.07.2020).
- Opel (2019). Einparkhilfe, <http://www.opelde.net/page-1680.html> (Abruf am 08.07.2020).

- Pagani, M. (2009): Roadmapping 3G mobile TV: Strategic thinking and scenario planning through repeated cross-impact handling. In: Technological Forecasting and Social Change 76 (3), S. 382–395.
- Pawlik, V. (2019): Anzahl der Personen in Deutschland, die Carsharing nutzen oder sich dafür interessieren, in den Jahren 2015 bis 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/257867/umfrage/carsharing-interesse-und-nutzung-in-deutschland/> (Abruf am 08.07.2020).
- Pakusch, C.; Bossauer, P.; Shakoob, M.; Stevens, G. (2016): Using, Sharing, and Owning Smart Cars – A Future Scenario Analysis Taking General Socio-Technical Trends into Account. In: Proceedings of the 13th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications 2 ICE-B, S. 19–30.
- Petrack, I. J.; Echols, A. E. (2004): Technology roadmapping in review: A tool for making sustainable new product development decisions. In: Technological Forecasting & Social Change 71, S. 81–100.
- Phaal, R. (2019): Architecting roadmaps, <https://www.cambridgeroadmapping.net/architecting/> (Abruf am 08.07.2020).
- Phaal, R.; Farrukh, C.J.P. (2000): Technology Planning Survey – Results. University of Cambridge: Centre for Technology Management.
- Phaal, R.; Muller, G. (2009): An Architectural Framework for Roadmapping: Towards Visual Strategy. In: Technological Forecasting and Social Science 76 (1), S. 39–49.
- Phaal, R.; Farrukh, C. J. P.; Probert, D. R. (2004a): Customizing roadmapping. In: Research Technology Management 47 (2), S. 26–37.
- Phaal, R.; Farrukh, C. J.P.; Probert, D. R. (2004b): Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. In: Technological Forecasting and Social Change 71 (1–2), S. 5–26.
- Phaal, R.; Farrukh, C. J. P.; Probert, D. R. (2007): Strategic roadmapping: a workshop-based approach for identifying and exploring innovation issues and opportunities. In: Engineering Management Journal 19 (1), S. 16–24.
- Phaal, R.; O’Sullivan, E.; Routley, M.; Ford, S.; Probert, D. (2011): A framework for mapping industrial emergence. In: Technological Forecasting and Social Change 78 (2), S. 217–230.
- Pham, A.; Dacosta, I.; Jacot-Guillarmod, B.; Huguenin, K.; Hajar, T.; Tramèr, F.; Gligor, V.; Hubaux, Jean-Pierre (2017): PrivateRide. A Privacy-Enhanced Ride-Hailing Service. In: Proceedings on Privacy Enhancing Technologies (2), S. 38–56.

- Probert, D. R.; Farrukh, C. J. P.; Phaal, R. (2003): Technology roadmapping – developing a practical approach for linking resources to strategic goals. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture (217), S. 1183–1195.
- Proff, Heike (Hrsg.) (2014): Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Prognos (2018): Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte. Auswirkungen auf Bestand und Sicherheit. Unter Mitarbeit von Sven Altenburg, Hans-Paul Kienzler und Alex auf der Maur, [https://www.adac.de/-/media/pdf/motorwelt/prognos\\_automatisierungsfunktionen.pdf?la=de-de&hash=4FE03D2842A22A8F900AE176AFCA6887](https://www.adac.de/-/media/pdf/motorwelt/prognos_automatisierungsfunktionen.pdf?la=de-de&hash=4FE03D2842A22A8F900AE176AFCA6887) (Abruf am 08.07.2020).
- Ratcliffe, S. (Hrsg.) (2016): Oxford Essential Quotations. Roy Amara 1925–2007, American futurologist. 4. Auflage, Oxford University Press, <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780191826719.001.0001/q-oro-ed4-00018679> (Abruf am 08.07.2020).
- Ravindra, S. (2017): The Machine Learning Algorithms Used in Self-Driving Cars, <https://www.kdnuggets.com/2017/06/machine-learning-algorithms-used-self-driving-cars.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Reuters (2016): Apple invests \$1 billion in Chinese ride-hailing service Didi Chuxing, <https://www.reuters.com/article/us-apple-china-idUSKCN0Y404W> (Abruf am 08.07.2020).
- Richey, J. M.; Grinnell, M. (2004): Evolution of Roadmapping at Motorola. In: Research-Technology Management 47 (2), S. 37–41.
- Richter, N. (2019): Braucht Autonomes Fahren die Datenautobahn 5G?, <https://www.vdi.de/news/detail/braucht-autonomes-fahren-die-datenautobahn-5g> (Abruf am 08.07.2020).
- Rivian (2019): Rivian announces \$700M investment round led by Amazon, <https://media.rivian.com/rivian-announces-700m-investment-round-led-by-amazon/> (Abruf am 08.07.2020).
- Roos, M.; Siegmann, M. (2018): Gesamtwirtschaftliche Kosteneinsparpotenziale durch das automatisierte Fahren. Eine ökonomische Abschätzung für Deutschland. In: TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 27 (2), S. 23–30.

- SAE International (Society of Automotive Engineers) (2014): Automated Driving. Levels of Driving Automation are defined in new SAE International standard J3016, [https://web.archive.org/web/20161120142825/http://www.sae.org/misc/pdfs/automated\\_driving.pdf](https://web.archive.org/web/20161120142825/http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf) (Abruf am 08.07.2020).
- Saffo, P. (2014): Google Self-Driving Cars Will Be the New Moon Landing, <https://www.youtube.com/watch?v=aPKa2-UoTd4> (Abruf am 08.07.2020).
- Samaranayake, S.; Spieser, K.; Guntha, H.; Frazzoli, E. (2017): Ridepooling with trip-chaining in a shared-vehicle mobility-on-demand system. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- Saritas, O.; Aylen, J. (2010): Using scenarios for roadmapping: The case of clean production. In: Technological Forecasting and Social Change 77 (7), S. 1061–1075.
- Schade, W.; Kühn, A. (2012): Neue Mobilitätskonzepte – Die Zukunft der Automobilindustrie? TAB-Brief Nr. 41, [https://www.itas.kit.edu/downloads/tab-brief/tb041\\_scku12a.pdf](https://www.itas.kit.edu/downloads/tab-brief/tb041_scku12a.pdf) (Abruf am 08.07.2020).
- Schäperkötter, H.; Deppe, L. (2017): Von Trends und latenten Kundenbedürfnissen zu Innovationsroadmaps am Beispiel eines Zulieferers. In: Martin G. Möhrle und Ralf Isenmann (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 4. Auflage, Springer, S. 247–258.
- Schwarz, B. (2019): Elektroautos: Umweltretter oder Untergang der deutschen Autoindustrie?, <https://de.sputniknews.com/kommentare/20190128323739107-e-autos-umwelt-autoindustrie/> (Abruf am 08.07.2020),
- Seat (2019): Ultraschall-Einparkhilfe, <https://www.seat.de/service-zubehoer/technik-lexikon/u/ultraschall-einparkhilfe.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Sessa, C.; Pietroni, F.; Alessandrini, A.; Stam, D.; Delle Site, P.; Holguin, C. (2015): Results on the on-line DELPHI survey – Automated urban vehicles. Projektbericht D27.2 im EU-Projekt CityMobil2.
- Solomon, S. (2018): Israeli researchers develop infrared film for smartphones, self-driving cars, <https://www.timesofisrael.com/israeli-researchers-develop-infrared-film-for-smartphones-self-driving-cars/> (Abruf am 08.07.2020).

- Sprecht, D.; Behrens, S.; Richter, M. (2017): Strategische Planung mit Roadmaps – Möglichkeiten für das Innovationsmanagement, die Personalbedarfs- und die Fabrikplanung. In: Martin G. Möhrle und Ralf Isenmann (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 4. Auflage, Springer, S. 65–82.
- Steinmüller, K. (2017): Methoden der Zukunftsforschung – Langfristorientierung als Ausgangspunkt für das Technologie-Roadmapping. In: Martin G. Möhrle und Ralf Isenmann (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 4. Auflage, Springer, S. 29–46.
- Steinmüller, A.; Steinmüller, K. (2004): Wild Cards. Wenn das Unwahrscheinliche eintritt. 1. Auflage, Hamburg: Murmann Verlag.
- Strauss, J. D.; Radnor, M. (2004): Roadmapping for Dynamic and Uncertain Environment. In: Research Technology Management 47 (2), S. 51–57.
- Stricker, K.; Kalmbach, R.; Zayer, R. (2018): Neue urbane Mobilität: Der Wandel erfolgt jetzt. Studie.
- Suomalainen, T.; Salo, O.; Abrahamsson, P.; Similä, J. (2011): Software product roadmapping in a volatile business environment. In: Journal of Systems and Software 84 (6), S. 958–975.
- Swisscom (2015): Swisscom zeigt das erste selbstfahrende Auto auf Schweizer Strassen, <https://www.swisscom.ch/de/about/news/2015/05/20150512-MM-selbstfahrendes-Auto.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Tesla (2019): Tesla Autonomy Day. Video, <https://www.youtube.com/watch?v=Ucp0TTmvqOE> (Abruf am 08.07.2020.)
- Tierney, R.; Hermina, W.; Walsh, S. (2013): The pharmaceutical technology landscape: A new form of technology roadmapping. In: Technological Forecasting and Social Change 80 (2), S. 194–211.
- Tuominen, A.; Ahlqvist, T. (2010): Is the transport system becoming ubiquitous? Socio-technical roadmapping as a tool for integrating the development of transport policies and intelligent transport systems and services in Finland. In: Technological Forecasting and Social Change 77 (1), S. 120–134.
- Taylor, E.; Oreskovic, A. (2015): Apple studies self-driving car, auto industry source says, <https://www.reuters.com/article/us-apple-autos/apple-studies-self-driving-car-auto-industry-source-says-idUSKBN0LI0IJ20150214> (Abruf am 08.07.2020).
- Uber (2019): Die Uber App weltweit nutzen, <https://www.uber.com/global/de/cities/> (Abruf am 08.07.2020).

- U.S. Department of Energy (2019): Technology Roadmaps, <https://www.energy.gov/eere/ssl/technology-roadmaps> (Abruf am 08.07.2020).
- Ulrich, K. (2019): Autoindustrie: Transformation oder Untergang, <https://p.dw.com/p/3FtBQ> (Abruf am 08.07.2020).
- Urbach, J. P. (2018): Car2X: Wenn Autos mit der Umwelt kommunizieren, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autonomes-fahren/technik-vernetzung/car2x-kommunikation/?redirectId=quer.car2x> (Abruf am 08.07.2020).
- Urmson, Chris (2015): How a driverless car sees the road, <https://www.youtube.com/watch?v=tiwVMrTLUWg> (Abruf am 08.07.2020).
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2018a): Automatisiertes Fahren. Die Innovationen deutscher Ingenieurskunst, <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/zukunft-serienmaessig.html> (Abruf am 05.01.2020).
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2018b): Automatisiertes Fahren. Die mobile Welt von morgen, <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/mobile-welt.html> (Abruf am 05.01.2020).
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2018c): Automatisiertes Fahren. Automatisiertes Fahren und Vernetzung, <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/intelligenter-strassenverkehr.html> (Abruf am 05.01.2020).
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2018d): Automatisiertes Fahren. Platooning – Innovation im Güterverkehr, <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/platooning.html> (Abruf am 05.01.2020).
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2018e): Automatisiertes Fahren. Innovationsführerschaft der deutschen Automobilindustrie, <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html> (Abruf am 05.01.2020).
- Vieweg, C. (2016): Ohne Echtzeitdaten geht es nicht, <https://www.zeit.de/mobilitaet/2016-04/autonomes-fahren-mobilfunk-5g-echtzeitdaten/komplettansicht> (Abruf am 08.07.2020).

- Vogt, K. (2017): How we're solving the LIDAR problem, <https://medium.com/cruise/how-were-solving-the-lidar-problem-8b4363ff30db> (Abruf am 08.07.2020).
- Volvo Group (2018): Volvo Trucks and FedEx demonstrate Truck Platooning. Pressemitteilung, <https://www.volvogroup.com/en-en/news/2018/jun/news-2971141.html> (Abruf am 08.07.2020).
- Vosooghi, R.; Kamel, J.; Puchinger, J.; Leblond, V.; Jankovic, M. (2019): Robo-Taxi service fleet sizing: assessing the impact of user trust and willingness-to-use. In: Transportation 46 (6), S. 1997–2015.
- Warren, D.; Dewar, C. (2014): Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, <https://www.gsmainelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download> (Abruf am 08.07.2020).
- Waymo (2019). Technology, <https://waymo.com/tech/> (Abruf am 08.07.2020).
- Weitkamp, C. (Hrsg.) (2005): Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Springer Series in Optical Sciences. New York: Springer.
- Will, D.; Eckstein, L., Bargaen, S. von; Taefi, T.; Galbas, R. (2017): State of the art analysis for Connected and Automated Driving within the SCOUT project. In: Conference paper ITS World Congress 2017 Montreal.
- Williams, J. (2015): Jeff Williams of Apple calls the car the ultimate mobile device. Code Conference. Rancho Palos Verdes, USA, [https://www.youtube.com/watch?v=muPg0Oibg84&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=muPg0Oibg84&feature=emb_logo) (Abruf am 08.07.2020).
- Willyard, C. H.; McClees, C. W. (1987): Motorola's Technology Roadmap Process. In: Research Management 30 (5), S. 13–19.
- Yamashita, Y.; Nakamori, Y.; Wierzbicki, A. P. (2009): Knowledge synthesis in technology development. In: Journal of Systems Science and Systems Engineering 18 (2), S. 184–202.
- Yasunga, Y.; Watanabe, M.; Korenaga, M. (2009): Application of technology roadmaps to governmental innovation policy for promoting technology convergence. In: Technological Forecasting & Social Change, S. 61–79.
- ZEW (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung) (2016): Indikatorenbericht zur Innovationserhebung 2015, [http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/mip/15/mip\\_2015.pdf](http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/mip/15/mip_2015.pdf) (Abruf am 08.07.2020).



- Zhang, Y.; Zhou, X.; Porter, A. L.; Vincente-Gomila, J. M.; Yan, A. (2014): Triple Helix innovation in China's dye-sensitized solar cell industry: hybrid methods with semantic TRIZ and technology roadmapping. In: Scientometrics 99 (1), S. 55–75.
- Zipcar (2019): The Future of Car Sharing with Autonomous Wheels, <https://www.zipcar.com/ziptopia/future-city/future-of-car-sharing-with-autonomous-wheels> (Abruf am 08.07.2020).
- Zurcher, R.; Kostoff, R. N. (1997): Modelling Technology Roadmaps. In: Journal of Technology Transfer 22 (3), S. 73–80.
- Zwierlein, E.; Isenmann, R. (1994): Philosophie der Technik. In: Der Wirtschaftsingenieur 28 (4), S. 4–10.



## Autoren

**Prof. Dr. Michael Roos** ist seit 2009 Inhaber des Lehrstuhls für Makroökonomik an der Ruhr-Universität Bochum und arbeitet vor allem in den Bereichen Komplexitätsökonomik, agentenbasierte Modellierung, Nachhaltigkeit und ökonomische Methodologie.

**Marvin Siegmann** hat einen Bachelor of Science, studiert Ethics – Economics, Law and Politics im Masterprogramm der Ruhr-Universität Bochum und arbeitet am Lehrstuhl für Makroökonomik in den Bereichen automatisiertes Fahren und agentenbasierte Modellierung.

---

Das autonome Fahren könnte zu einem radikalen Umbruch in der Automobilbranche und im Verkehrssystem führen. Beim autonomen Fahren zählt Deutschland zwar zu den Technologieführern, es wird sich aber nicht nur das Produkt Automobil, sondern auch dessen Nutzung ändern. Die Herausforderung besteht deshalb auch darin, die technisch hochentwickelten Produkte in neue, profitable Geschäftsmodelle zu überführen.

Die Studie führt Erkenntnisse aus der Forschungsliteratur und aus Experteninterviews in Technologie-Roadmaps zusammen und skizziert ein inkrementelles und ein disruptives Szenario.

---