



TECHNOLOGIEKALENDER

Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg

Leitfaden

April 2020



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

Im Auftrag des
Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg

Im Rahmen des
Strategiedialogs Automobilwirtschaft Baden-Württemberg

Impressum.

Vorwort

Die Verfasser*innen danken zahlreichen Expert*innen für Antworten auf ihre Fragen und die Teilnahme an der Delphi-Befragung sowie den Workshops. Ohne sie wären viele der neuen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen nicht möglich gewesen.

Herausgeber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte

Projektleitung

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Dr.-Ing. Stephan Schmid

Projektpartner und Autor*innen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Christian Ulrich, Benjamin Frieske, Dr.-Ing. Stephan Schmid

IMU Institut GmbH

Sylvia Stieler, Dr. Martin Schwarz-Kocher

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
IPEK - Institut für Produktentwicklung
Florian Marthaler, Sascha Ott, Jonas Reinemann

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
Dr.-Ing. Peter Bickel, Simon Schwarz, Anna-Lena Fuchs, Maike Schmidt

April 2020

© Copyright liegt bei den Herausgebern. Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.

Technologiekalendar: Der technologische Wandel des Automobils durch Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung.

Auf einen Blick.

Die Automobilbranche befindet sich derzeit in einer Phase großer Veränderungen. Es findet eine technologische Weiterentwicklung der bekannten Fahrzeugkonzepte entlang dreier wesentlicher Pfade statt: vom Verbrennungsmotor hin zum elektrifizierten Antriebsstrang (*Electrification*), vom fahrgesteuerten hin zum automatisierten (*Automation*) und zum vernetzten Fahrzeug (*Connectivity*).

Diese Entwicklungen bergen angesichts sich verändernder Produkthanforderungen und struktureller Verschiebungen der eingefahrenen Produktions- und Wertschöpfungsketten weitreichende Herausforderungen für Unternehmen, während sich aber auch Chancen für neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungspotenziale eröffnen. Fakt ist: Die bereits in der Branche spürbaren Veränderungen werden sich weder aufhalten noch umkehren lassen.

Die zentrale Frage für Unternehmen im Strukturwandel ist die nach zukunftsfähigen Produkten, die auf Basis bestehender Fertigungskompetenzen

angeboten werden können. Das gilt insbesondere für baden-württembergische Unternehmen, deren Wettbewerbsvorteil vor allem in der industriellen Serienfertigung innovativer Produkte besteht.

Gleichzeitig ist gerade für kleine und mittlere Unternehmen schwierig einzuschätzen, wie das Automobil in der Überlagerung von technischen Optionen, der Einhaltung von Klimazielen und gesellschaftlichen Veränderungen zukünftig aussehen wird. Der „Technologiekalendar Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg“ (TKBW) wurde mit dem Ziel entwickelt, den vom Strukturwandel betroffenen Unternehmen eine Orientierungshilfe zu geben.

Neben dem vorliegenden Leitfaden umfasst der Technologiekalendar einen Modulkatalog, der die zeitliche Entwicklung relevanter Module und Komponenten umfasst (44 Roadmaps) sowie eine Beschreibung relevanter Schlüsseltechnologien in Form von 148 Technologiesteckbriefen, inklusive der zeitlichen Einordnung anhand von Reifegraden (TRL/MRL) (Abbildung 1).

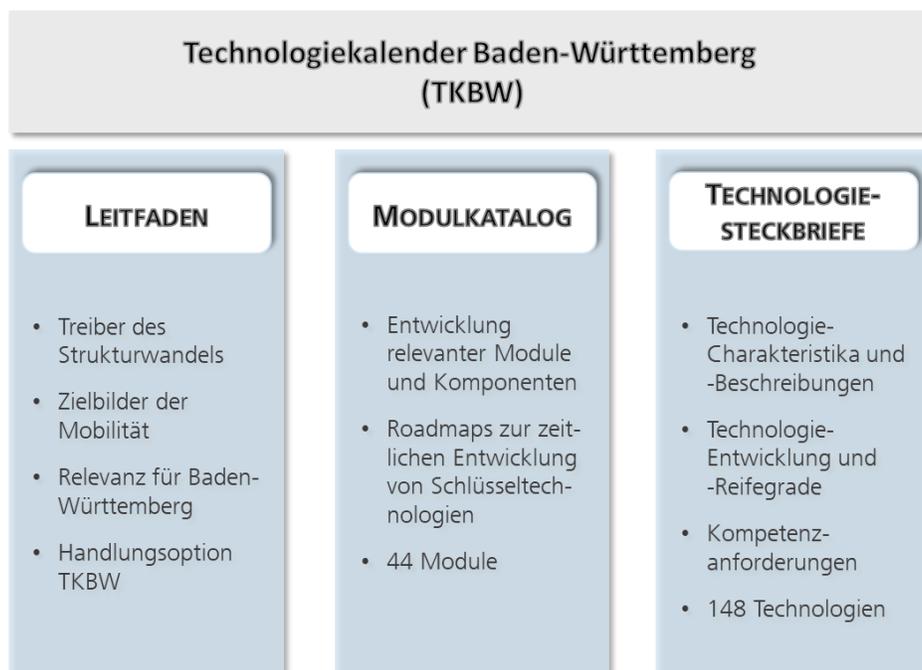


Abbildung 1: Projektergebnisse – die drei Säulen des Technologiekalendar (Quelle: eigene Darstellung)

Der Leitfaden fasst die wesentlichen Veränderungen und Herausforderungen für die baden-württembergische Automobilindustrie zusammen. Dazu wurden zunächst die Einflüsse auf die Automobilbranche im Spannungsfeld von Technologie, Umwelt und Gesellschaft untersucht (Kapitel 1). Im Kern zeigen sich drei Pfade für die technologische Entwicklung des Automobils: die Änderung des Antriebsstrangs hin zur Elektrifizierung (*Electrification*), die intelligente Vernetzung der Fahrzeuge (*Connectivity*) und automatisiertes/ autonomes Fahren in seinen unterschiedlichen Ausprägungen (*Automation*). Des Weiteren entstehen auch neue Geschäftsmodelle im Bereich Fahrzeugnutzung und Dienstleistungen rund um das Fahrzeug (*Sharing & Services*).

Aus diesen Entwicklungslinien lassen sich mögliche Zukunftswelten des Automobilmarkts ableiten. In Kapitel 2 und 3 dieses Leitfadens sind diese in Form möglicher Markthochläufe für alternative Antriebskonzepte sowie für die Durchdringung des automatisierten und autonomen Fahrens illustriert. Kapitel 4 beschreibt wiederum, wie sich die technologischen Entwicklungen auf Fahrzeug- und Mobilitätskonzepte auswirken.

Vor dem Hintergrund der technologischen Transformation werden in Kapitel 5 die Standortperspektiven für Unternehmen des baden-württembergischen Automobilclusters diskutiert. Der Leitfaden dient gleichzeitig als Lesehilfe für den Modulkatalog sowie die Technologiesteckbriefe-

fe. Entsprechende Hinweise zur Handhabung des TKBW finden sich in Kapitel 6. Für die Erstellung des Modulkatalogs und der Technologiesteckbriefe wurden 169 Fachexperten in einer zweistufigen Delphi-Methode angefragt. Die Ergebnisse wurden zudem im Rahmen von 3 Stakeholder-Workshops diskutiert sowie in einem Webinar vorgestellt.

Modulkatalog und Technologiesteckbriefe wurden mit dem Ziel entwickelt, den technologischen Wandel des Automobils insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen aus der Zulieferindustrie konkret und greifbar zu machen. Dafür wurden 44 Module identifiziert, die besonders von der technologischen Transformation des Automobils betroffen sind. Der Modulkatalog gibt für jedes dieser Module einen Überblick über die dazugehörigen Technologien. Für jede dieser Technologien ist zudem die zeitliche Entwicklung des Technologiereifegrads (TRL) und des Herstellungsreifegrads (MRL) in Roadmaps zusammengefasst.

Detaillierte Informationen zu jeder Technologie sind in den insgesamt 148 Technologiesteckbriefen dargestellt. Jeder Steckbrief enthält dabei neben einer kurzen Beschreibung der Technologie eine Übersicht über die jeweiligen Vorteile, Hemmnisse für die Einführung, Einsatzbereiche, Leistungsparameter und relevanten Kompetenzen.

Abbildung 2 illustriert Vorgehen und Ergebnisse der Erstellung des Technologiekalenders.



Abbildung 2: Umfang des Technologiekalenders (Quelle: eigene Darstellung)

Inhaltsverzeichnis.

1	Vielfältige Einflüsse verändern die Automobilbranche in der Zukunft.	6
2	Mögliche Zukunftswelten des Automobilmarkts und Entwicklungspfade alternativer Antriebskonzepte.....	8
2.1	Die batterieelektrische Welt (BEV Welt).	9
2.2	Die Wasserstoff-Welt (H ₂ -Welt).	10
2.3	Die Synthetische-Kraftstoffe-Welt (SynFuel-Welt).	11
3	Mögliche Zukunftswelten und Entwicklungspfade bei automatisierten und vernetzten Fahrzeugen.	13
3.1	Die konservative Welt automatisierten Fahrens.	15
3.2	Die progressive Welt automatisierten Fahrens.	16
4	Entwicklung und Veränderungen der Fahrzeugkonzepte.	17
4.1	Effizienzsteigerung im Antriebsstrang: Entwicklungen und Veränderungen relevanter Module und Komponenten.	17
4.2	Vernetztes, automatisiertes und autonomes Fahren: Entwicklungen und Veränderungen relevanter Module und Komponenten.	19
4.3	Exkurs: Ausblick auf zukünftige Entwicklungen bei Fahrzeugkonzepten.	21
5	Die Standortperspektiven für Baden-Württemberg.	24
5.1	Die Standortkompetenz in Baden-Württemberg.	25
5.2	Die Herausforderungen der Transformation in der Automobilindustrie.	26
6	Der Technologiekalender als Leitfaden durch den technologischen Wandel.	31
6.1	Lesehilfe für den Technologiekalender.....	31
6.2	Methodisches Vorgehen bei der Erstellung des Technologiekalenders.	35
7	Schlussbemerkung.	36

1 Vielfältige Einflüsse verändern die Automobilbranche in der Zukunft.

Die Automobilbranche befindet sich derzeit in einer Phase großer Veränderungen. Es findet eine technologische Entwicklung der bekannten Fahrzeugkonzepte entlang von drei wesentlichen Pfaden statt:

- 1) die Änderung des Antriebsstrangs hin zur Elektrifizierung (*Electrification*),
- 2) die intelligente Vernetzung der Fahrzeuge (*Connectivity*),
- 3) autonomes Fahren in seinen unterschiedlichen Ausprägungen (*Automation*).

Diese Entwicklungen bergen angesichts sich verändernder Produkthanforderungen und struktureller Verschiebungen der eingefahrenen Produktions- und Wertschöpfungsketten erhebliche Herausforderungen für Unternehmen. Es eröffnen sich aber auch Chancen durch neue Funktionalitäten, neue Fahrzeugkonzepte und letztlich neue Geschäftsmodelle im Bereich Fahrzeugnutzung und Dienstleistungen rund um das Fahrzeug (*Share*

ring & Services). Fakt ist: Die bereits in der Branche spürbaren Veränderungen werden sich weder aufhalten noch umkehren lassen.

In Abbildung 3 sind Megatrends und weitere Treiber für die technologische Entwicklung des Automobils dargestellt. Im Projekt wird im Besonderen auf die Aspekte *Automation/Connectivity* sowie *Electrification* Bezug genommen. Im Folgenden werden die wesentlichen Trends und Treiber für anstehende Veränderungen in diesen Bereichen eingeordnet.

Die Elektrifizierung wird neben der technischen Entwicklung wesentlich vom Megatrend Klimawandel getrieben. Dieser dominiert auch die energiebezogenen Trends *Einsatz erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung und im Verkehr* und *Energieeffizienz im Verkehr*. Es zeigt sich zunehmend, dass große Anstrengungen notwendig sind – die Anzeichen eines sich gravierend verändernden weltweiten Klimas sind eindeutig.

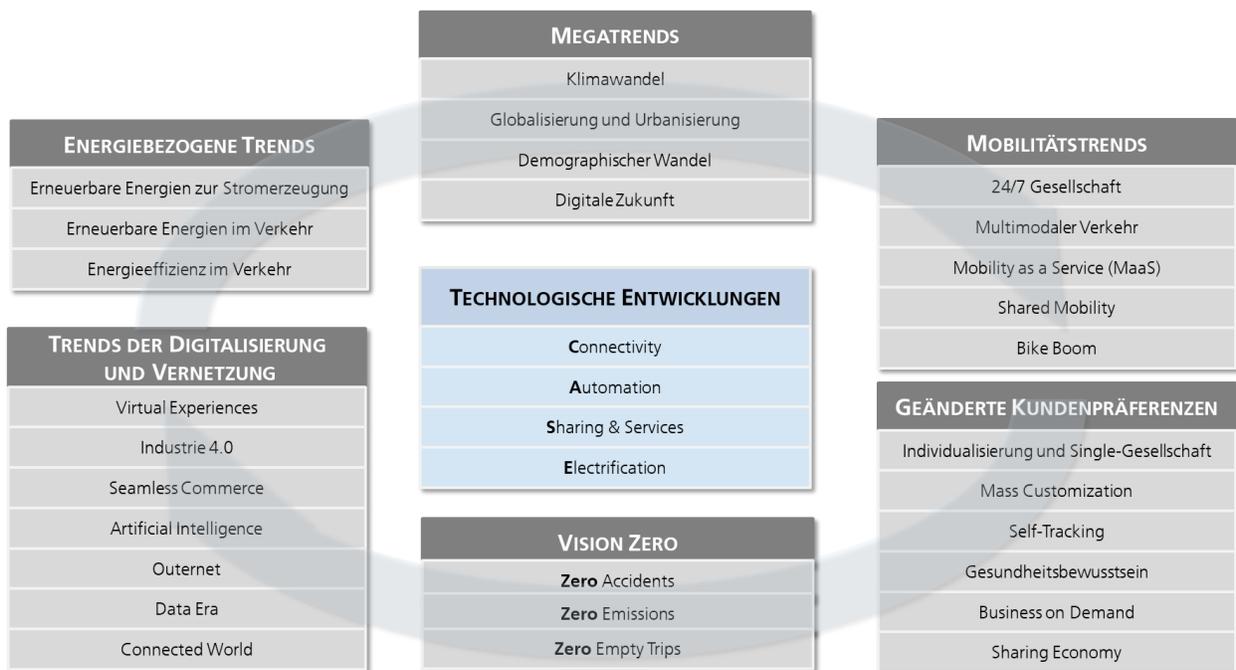


Abbildung 3: Die Entwicklung des Automobils im Spannungsfeld von Technologie, Umwelt und Gesellschaft (Quelle: eigene Darstellung)

Im Vergleich der Potenziale unterschiedlicher klimaneutraler Energieträger zeigt sich, dass derzeit nur elektrische Energie in ausreichendem Maße nachhaltig und ohne Klimabelastung hergestellt werden kann. Biomasse als Alternative ist in der verfügbaren Menge limitiert, da eine Wechselwirkung mit der Nahrungsmittelproduktion besteht und deshalb aus ethischen Gründen ein umfassender energetischer Einsatz von Biomasse problematisch ist. Grundsätzlich bestehen weitere Möglichkeiten zur Senkung der Treibhausgasemissionen der Energieversorgung in der Nutzung von Kernenergie sowie der Abscheidung und Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) oder stofflichen Nutzung (Carbon Capture and Usage, CCU) von Kohlenstoffdioxid. Aus Gründen der Akzeptanz, der technischen Reife, der Wirtschaftlichkeit sowie der langfristigen Klimaneutralität erscheint derzeit allerdings die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien als relevanteste und realistischste Option.

Zudem bietet die Elektrifizierung im Hinblick auf weitere Zielvorgaben Vorteile: Die Effizienz wird gesteigert und lokale Emissionen von Lärm und Luftschadstoffen werden verringert. Offen ist aktuell noch die Frage, welche Anteile die unterschiedlichen, auf Strom basierenden Antriebsarten (Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstoff sowie synthetische Kraftstoffe) zukünftig einnehmen werden. Dies wird sich voraussichtlich regional und anwendungsbezogen unterschiedlich entwickeln. In Abschnitt 2 werden zur Illustration drei mögliche Zukunftswelten eines europäischen Automobilmarkts skizziert.

Mit den Megatrends *Urbanisierung*, *demografischer Wandel* und *digitale Zukunft* gehen gesellschaftliche Veränderungen einher. Der Mensch hat ein Grundbedürfnis nach Mobilität, das mit steigendem Wohlstand kontinuierlich gewachsen ist. Eine Veränderung findet jedoch hinsichtlich der Einstellung zum Fahrzeugbesitz statt: Mit zunehmender Verfügbarkeit von *Sharing*-Konzepten

verliert der Besitz eines eigenen Fahrzeugs an Bedeutung. Mobilität als Dienstleistung (*Mobility as a Service*) zu begreifen verändert damit auch das bisherige Geschäftsmodell der Automobilbranche fundamental.

Damit diese Veränderung jedoch eintritt, müssen mehrere Faktoren zusammenkommen: Der ortsunabhängige Zugriff auf Mobilitätsangebote ist ebenso wichtig wie die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander sowie das Angebot einer durchgängigen Mobilitätskette mit unterschiedlichen Mobilitätsdienstleistern (Bahn, Mietwagen, Leihfahrrad etc.). Verstärkt werden diese Entwicklungen durch die Urbanisierung, da die Bevölkerungsdichte einen direkten Einfluss auf das Serviceangebot nimmt.

Die Technologie zum autonomen Fahren wird zukünftig günstiger werden. Insbesondere im Hinblick auf die Zielvorstellung *Vision Zero* sind die Anforderungen an die Verlässlichkeit der Systeme und den Grad der Verbreitung enorm. Unter *Vision Zero* werden die Einzelziele *Zero Accidents* (keine [schweren] Unfälle mehr), *Zero Empty Trips* (Steigerung der Effizienz durch Vermeidung von Leerfahrten im Güter- und Personenverkehr) sowie *Zero Emissions* (Vermeidung der Emissionen des Verkehrs) zusammengefasst.

Ein dermaßen optimiertes System ist nur durch technologisch weit entwickelte und sensor- sowie kommunikationstechnisch flächendeckend verfügbare Systeme darstellbar. Dadurch steigen voraussichtlich die Anschaffungs- und Betriebskosten eines individuellen Fahrzeugs deutlich an, so dass der individuelle Fahrzeugbesitz, wie wir ihn heute kennen, für die breite Masse der Gesellschaft nicht mehr wirtschaftlich darstellbar werden könnte. Stattdessen könnte die Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse dann überwiegend durch Mobilitätsdienstleistungen erfolgen.

2 Mögliche Zukunftswelten des Automobilmarkts und Entwicklungspfade alternativer Antriebskonzepte.

Es ist derzeit unklar, welche Antriebstechnologien sich mittel- und langfristig auf den europäischen und globalen Pkw-Fahrzeugmärkten durchsetzen. Die Entwicklung unterschiedlicher politischer, gesetzlicher, marktlicher und technologischer Rahmenbedingungen definiert die Geschwindigkeit des Markthochlaufs alternativ betriebener Fahrzeuge, sogenannte *Gamechanger* und *Showstopper* stellen hierfür Schlüsselereignisse dar.

Für den europäischen Markt haben die technologischen Entwicklungen der OEMs insbesondere das Ziel die Emissionsgrenzwerte der EU (95 g CO₂/km ab 2020/21, -15 % bis 2025, -37,5 % bis 2030) über die gesamte Fahrzeugflotte hinweg einhalten zu können, um keine Strafzahlungen (95 EUR je g CO₂ über dem Grenzwert, multipliziert mit Zulassungszahl des Vorjahres) leisten zu müssen.

Neben der Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs mit Verbrennungsmotor, inklusive geringer Elektrifizierung (zum Beispiel ICE efficient, Mild-Hybrid, Voll-Hybrid), können generell drei technologische Entwicklungspfade mit jeweils unterschiedlichen Auswirkungen auf die potenzielle Marktnachfrage der hinterlegten Komponenten und Technologien differenziert werden:

1. die Transformation hin zu hoch- oder rein-elektrifizierten Fahrzeugen (zum Beispiel Plug-in Hybrid [PHEV], Battery Electric Vehicle [BEV]),
2. der Einsatz Wasserstoff-basierter Antriebstechnologien wie Brennstoffzellen (zum Beispiel Fuel Cell Vehicle [FCV]),
3. die Nutzung regenerativer und synthetischer Kraftstoffe im konventionellen Antriebsstrang (zum Beispiel Syn-Fuels, e-Diesel).

Um die erforderliche Treibhausgasemissionsminderung zu erreichen setzen alle drei Pfade den Einsatz von klimaneutral gewonnener Energie (vor allem Strom) voraus.

Darüber hinaus stehen die genannten Entwicklungspfade in Konkurrenz zueinander, können sich aber in Teilen und je nach Anwendungsfall auch sinnvoll ergänzen.

So ist beispielsweise der Einsatz von Brennstoffzellen in Pkws auch bei hoch-elektrifizierten Fahrzeugen möglich (BZ-Plug-in Hybrid), die Beimischung synthetischer, CO₂-neutraler Kraftstoffe führt zu geringerem Emissionsausstoß bei optimierten, gering-elektrifizierten Verbrennungs-Fahrzeugen.

Im Rahmen dieser Studie werden drei Zukunftswelten betrachtet, die jeweils laut Experteneinschätzung maximal mögliche Entwicklungspfade je Technologiebereich illustrieren. Sie werden bewusst als Maximalszenarien angelegt, wobei sich die reale Entwicklung aller Voraussicht nach zwischen den Extremen bewegen wird. Hierfür fand eine Festlegung von Zielwerten bei Pkw-Neuwagenanteilen auf dem europäischen Markt für das Jahr 2035 statt. Jede der drei Zukunftswelten resultiert in signifikant unterschiedlicher Entwicklung der Marktnachfrage nach den jeweilig hinterlegten alternativen Antriebskonzepten wie auch relevanten Technologien und Komponenten.

Generell gilt, dass alle Zielbilder eine mögliche zukünftige Automobilwelt im Jahr 2035 darstellen, in der weiterhin das Paradigma des motorisierten Individualverkehrs auf der Straße dominiert. Ein nennenswerter Übergang des Mobilitätsverhaltens auf verstärkte Nutzung von öffentlichem Verkehr bzw. Individualverkehr mit autonom fahrenden Straßenfahrzeugen hat noch nicht eingesetzt. In der Folge wird weiterhin jährlich eine stabile Anzahl von Pkw neu für den Verkehr zugelassen. Auch der Güterverkehr auf der Straße bleibt weitgehend unverändert.

Steigerungen des Verkehrsaufkommens im Personen- und Güterverkehr werden durch die Schiene aufgefangen. Die Modellwechsel im Pkw-Bereich finden ca. alle sieben Jahre statt. Wesentliche Rahmenbedingung für die technische Entwicklung im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen der Fahrzeuge stellen die EU-Flottengrenzwerte dar.

2.1 Die batterieelektrische Welt (BEV Welt).

Das Zielbild für eine sehr hohe Elektrifizierungsrate zeichnet 80 % Marktanteil der rein batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV) im Jahr 2035. Auf dem europäischen Neuwagenmarkt werden allein im Zieljahr also ca. 12,5 Mio. BEV verkauft.

Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor werden auf dem europäischen Markt zu diesem Zeitpunkt nicht mehr nachgefragt. Ein kleinerer Anteil von 20 % wird hälftig als Plug-in-Hybrid (mit Verbrennungsmotor) und als Brennstoffzellenfahrzeug verkauft.

Dieses Bild der Zukunft setzt sehr ambitionierte Entwicklungen der Rahmenbedingungen voraus:

Die Ladeinfrastruktur wird flächendeckend und mit nahezu 100 % Verfügbarkeit in den europäischen Ländern ausgebaut, konventionelle Verbrennungs-Fahrzeuge hingegen verlieren durch höhere Steuern, höhere Kraftstoffpreise, Einfahrtbeschränkungen und -verbote sowie Verkaufs- bzw. Zulassungsverbote signifikant an Attraktivität.

Weiterhin ist in dieser Zukunftswelt die Batterieentwicklung technologisch so weit fortgeschritten, dass Reichweitenbeschränkungen bei BEV in der Breite keine kaufentscheidende Rolle mehr spielen. Im Zuge dieser Entwicklung werden kritische Rohstoffe (wie Kobalt) in der Batterie und anderen Komponenten weitgehend ersetzt bzw. deren Produktionsbedingungen im Hinblick auf Umweltbelastung und Arbeitsbedingungen verträglich gestaltet.

Die Fahrzeuge sind zudem aufgrund des erfolgreichen Eintritts in den Massenmarkt spätestens ab dem Jahr 2030 günstiger zu erwerben als konventionelle Fahrzeuge, die dann komplexe und aufwändige Abgasreinigungssysteme nutzen müssen.

Die Nachfrage nach den einzelnen Antriebsstrangkonzzepten in dieser Zukunftswelt ist in folgender Abbildung 4 illustriert:

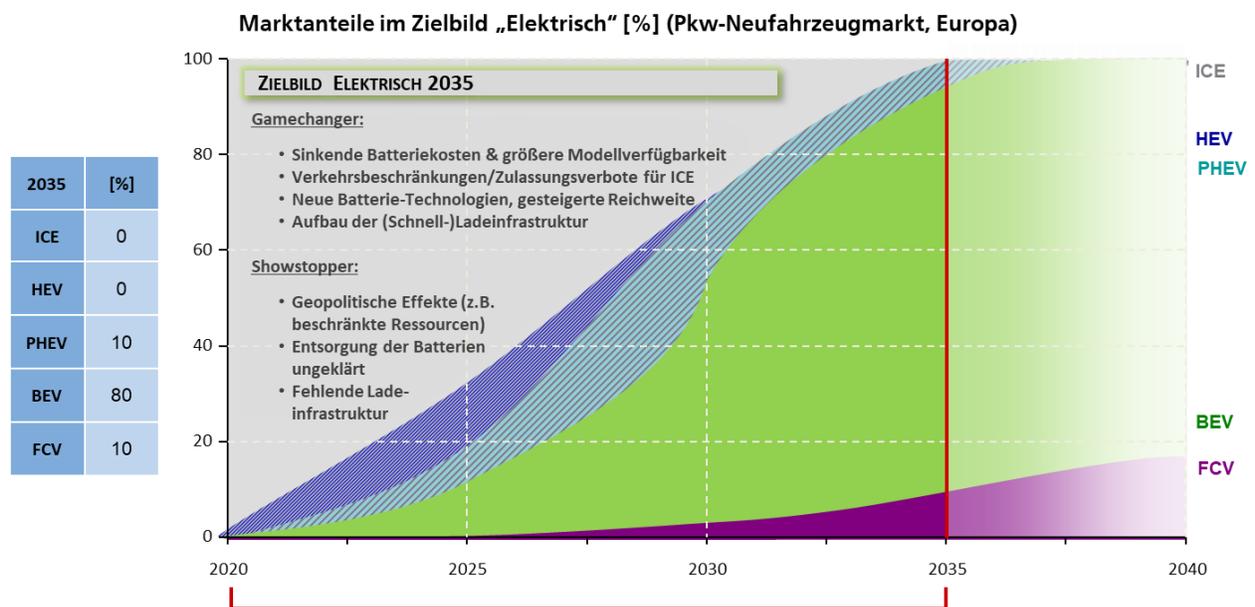


Abbildung 4: Illustration des Markthochlaufs alternativer Antriebskonzepte im Zielbild „BEV-Welt“, EU-Neuwagenmarkt, 2020-2035 (Quelle: eigene Darstellung)

2.2 Die Wasserstoff-Welt (H₂-Welt).

Neben der batterieelektrischen Mobilität ist die Wasserstoffmobilität mit Brennstoffzelle ein alternativer Pfad zur Nutzung elektrischer Energie im Verkehr. Der Einsatz des energiereichen Gases Wasserstoff vereint die Vor- aber auch die Nachteile der beiden Gegenpole: direkt elektrische Mobilität mit Batterien und der Einsatz (fossiler) chemischer Energieträgern im Verbrennungsmotor.

Die Emissionsbelastung, nicht nur mit CO₂, sondern auch hinsichtlich der Luftschadstoffe NO_x, Feinstaub, SO_x etc. entfällt beim Einsatz von grünem¹ Wasserstoff in Brennstoffzellen. Auch die lokale Lärmemission ist mit einem BEV vergleichbar. Der Zeitaufwand des Betankungsvorgangs und die Fahrzeugreichweiten wiederum entsprechen aktuellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

Neben diesen Vorteilen bestehen aber auch Herausforderungen: So bedarf es des Aufbaus einer eigenen Infrastruktur (Wasserstoff-Erzeugung, -Speicherung und -Verteilung).

Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-Elektroantriebs und der Gesamtwirkungskette (Strombereitstellung zur Fortbewegung) ist zwar um rund einen Faktor zwei besser als bei einem Verbrennungsmotor, jedoch ebenso um rund einen Faktor zwei schlechter als beim batterieelektrischen Fahrzeug. Hinzu kommt zu Beginn noch ein geringes Fahrzeugangebot der Hersteller, das aber voraussichtlich ausgebaut wird.

Das Zielbild für eine sehr starke Marktdurchdringung Wasserstoff-betriebener Fahrzeuge zeichnet 40 % Marktanteil der Fuel Cell Vehicles (FCV) auf dem europäischen Neuwagenmarkt im Jahr 2035, dies entspricht ca. 6,3 Mio. verkauften Brennstoffzellen-Pkw in diesem Jahr.

Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und geringem Elektrifizierungsgrad (ICE efficient, Mild-Hybrid) werden zum gleichen Anteil wie FCV abgesetzt, jedoch mit stetig abnehmender Tendenz. Hierbei steigen auch die Anteile CO₂-ärmerer synthetischer Kraftstoffe in der Beimischung zu konventionellem Benzin bzw. Diesel.

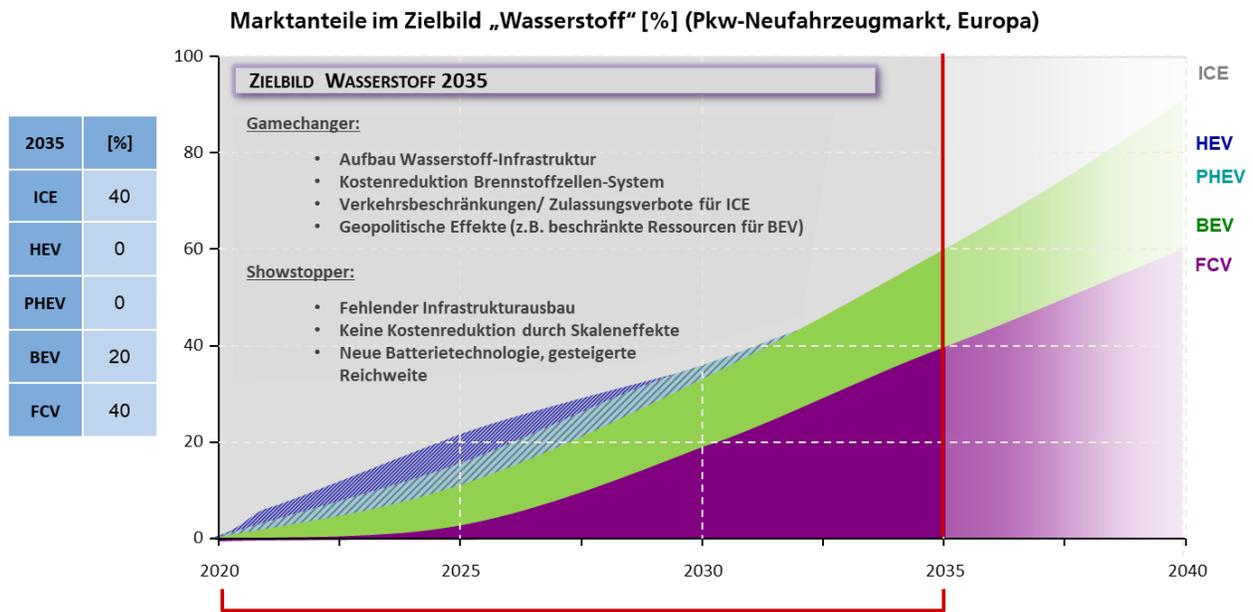


Abbildung 5: Illustration des Markthochlaufs alternativer Antriebskonzepte im Zielbild „H₂-Welt“, EU-Neuwagenmarkt, 2020-2035 (Quelle: eigene Darstellung)

¹ Unter grünem Wasserstoff wird jener Wasserstoff verstanden, der in einer Wasserelektrolyse unter Nutzung von erneuerbarem Strom produziert wird. So fallen in der Produktion dieses Wasserstoffs keine Emissionen an.

Das rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeug besitzt im Jahr 2035 Neuwagenmarktanteile von 20 %. Voll- und Plug-in Hybride werden zu diesem Zeitpunkt nicht mehr nachgefragt.

Dieses sehr ambitionierte Bild einer Wasserstoff-basierten Zukunft setzt voraus, dass alle politischen Vorgaben und Instrumente gezielt auf die Förderung dieser Technologie ausgerichtet sind und so u.a. eine H₂-Infrastruktur zur Betankung der Fahrzeuge aufgebaut wurde, die ungefähr der heutigen, konventionellen Tankstellenabdeckung entspricht. Weiterhin wird angenommen, dass Risiken in der Versorgungssicherheit bei für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge kritischen Ressourcen durch deren Ersatz bzw. die Umgestal-

tung der Produktionsbedingungen so weit wie möglich minimiert werden.

Der zunehmende Einsatz von Brennstoffzellen-Systemen im Nutzfahrzeugbereich und bei weiteren Verkehrsträgern unterstützt Know-How-Aufbau und -Diffusion, die eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung von Skaleneffekten in der Fertigung sind. Diese sind im Pkw-Sektor zwingend zu erzielen, um die erforderliche drastische Reduktion der Produktionskosten dieser Komponente zu erreichen.

Die Nachfrage nach den einzelnen Antriebsstrangkzepten in dieser Zukunftswelt ist in Abbildung 5 auf der vorhergehenden Seite illustriert.

2.3 Die Synthetische-Kraftstoffe-Welt (SynFuel-Welt).

Neben der batterieelektrischen Mobilität und der Wasserstoffmobilität mit Brennstoffzellen besteht ein dritter Pfad zur Einbindung regenerativer Energie in das Fahrzeug – die Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Hierbei wird durch die Hydrierung von CO₂ mit grünem Wasserstoff ein kohlenwasserstoffhaltiger Energieträger erzeugt.

Die Vorteile synthetischer Kraftstoffe gegenüber der batterieelektrischen und Wasserstoff-basierten Mobilität sind die Möglichkeiten zur Weiternutzung bereits bestehender Fahrzeugflotten und Infrastrukturen (Distribution, Lagerung) sowie die hohe Energiedichte der Kraftstoffe.

Nachteilig wirkt sich die direkte Umwandlungseffizienz aus. Sowohl bei der Herstellung der Kraftstoffe als auch bei der Nutzung im Fahrzeug wird nur ein geringer Teil der zuvor eingesetzten Energie zum Vortrieb genutzt. Eine direkte Stromnutzung oder der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzelle bieten hier deutliche Vorteile. Außerdem besteht ein erheblicher Mehrbedarf an regenerativer Stromerzeugungskapazität, die parallel zum Aufbau der Erzeugungsanlagen für synthetische Kraftstoffe im In- und Ausland errichtet werden muss.

Der Einsatz synthetischer Kraftstoffe ist daher insbesondere für eine Defossilisierung des Fahrzeugbestands sinnvoll (Deutschland rund 50 Mio. Fahrzeuge, weltweit über 1 Mrd. Fahrzeuge). Diese Fahrzeuge können kurz- und mittelfristig nicht vollständig ersetzt werden, so dass sie noch jahre-

oder gar jahrzehntelang im Einsatz bleiben. Es werden somit aus systemischer Sicht dringend Lösungen für die Reduktion antriebsbedingter CO₂-Emissionen von Bestandsfahrzeugen benötigt. Zudem gibt es heute und auch zukünftig Anwendungsfelder, für die die direkte Stromnutzung nur eingeschränkt möglich ist. Zur Überwindung langer Strecken und großer Lasten (Schwerlastverkehr, Schiffsverkehr und Luftfahrt) werden auch zukünftig Energieträger mit hoher volumetrischer Energiedichte benötigt.

Daher wird erwartet, dass weltweit ein signifikanter Bedarf an synthetischen Kraftstoffen entstehen wird: Kurz- und mittelfristig für die Treibhausgas-minderung bei Bestandsfahrzeugen, mittel- bis langfristig im Last- und Luftverkehr und auch als saisonaler Speicher für erneuerbare Energien, um große Energiemengen über Wochen und Monate speichern zu können.

Illustriert im dritten Zielbild einer möglichen Mobilität der Zukunft bedeutet dies, dass auf dem europäischen Pkw-Neuwagenmarkt im Zieljahr 2035 die Fahrzeuge überwiegend (teil-) elektrifiziert sein werden (60 % PHEV, 10 % HEV, 15 % BEV, 5 % FCV). Lediglich ein kleiner Anteil von 10 % wird noch als reiner Verbrenner (ICE) verkauft.

Die Beimischung CO₂-neutraler synthetischer Kraftstoffe führt gleichzeitig zu verringerten Treibhausgas-Emissionen der Fahrzeugflotte und trägt damit zur Erreichung der Klimaschutzziele bei.

In diesem Zielbild wird vorausgesetzt, dass national und international massiv in die industrielle Produktion synthetischer Kraftstoffe investiert wird. Dies eröffnet neben der fahrzeugeitigen Entwicklung (Elektrifizierung, Automatisierung, Vernetzung) zusätzlich neue Chancen und Geschäftsfelder im Bereich von Anlagen zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe. So könnten Unternehmen, die über entsprechende Kompetenzen bzw. Fertigungsverfahren verfügen, einen Einstieg in den Bereich Anlagen- und Prozesstechnik für Elektrolyse, Gasaufbereitung, Speicher usw. prä-

fen. Der erforderliche Aufbau von Produktionskapazitäten für synthetische Kraftstoffe verspricht einen sich dynamisch entwickelnden Markt im In- und insbesondere im Ausland.

Die Nachfrage nach den einzelnen Antriebsstrangkonzepten in dieser Zukunftswelt ist in folgender Abbildung 6 illustriert:

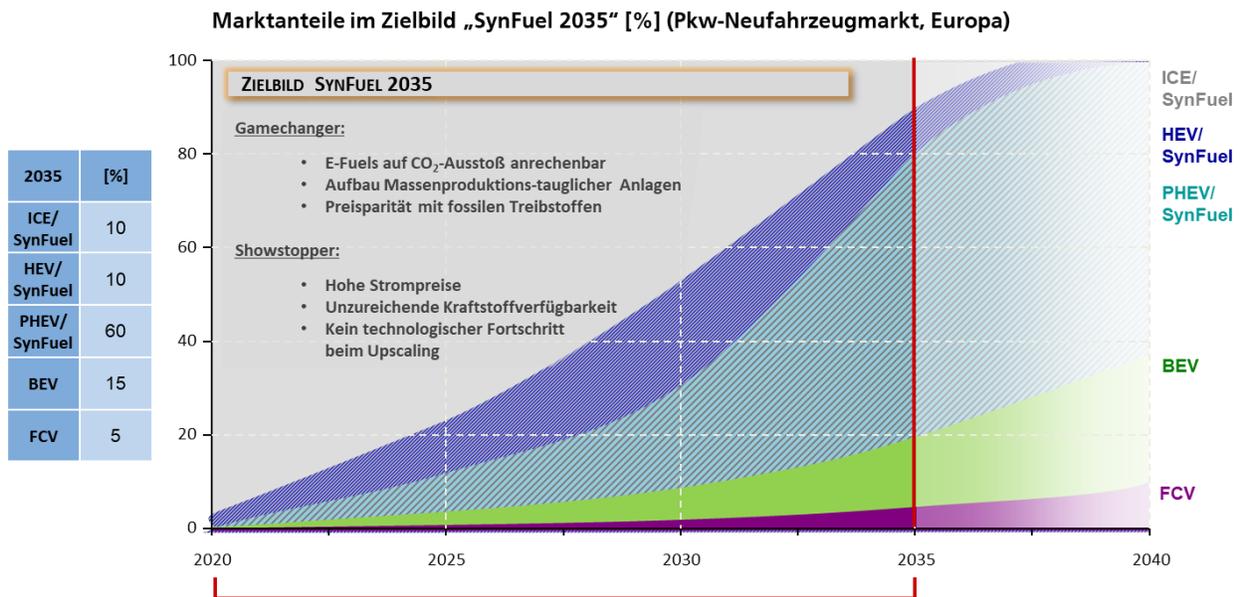


Abbildung 6: Illustration des Markthochlaufs alternativer Antriebskonzepte im Zielbild „SynFuel-Welt“, EU-Neuwagenmarkt, 2020-2035 (Quelle: eigene Darstellung)

3 Mögliche Zukunftswelten und Entwicklungspfade bei automatisierten und vernetzten Fahrzeugen.

In Ergänzung zu den möglichen Zukunftswelten für alternative Antriebskonzepte werden im Folgenden mögliche Markthochläufe für die Durchdringung des automatisierten und autonomen Fahrens beschrieben.

Die Vernetzung von Fahrzeugen ist eine wesentliche Voraussetzung für automatisiertes Fahren und wird daher in die Betrachtung der Automatisierungsstufen integriert. Es ist derzeit noch unklar, wann und ob hochautomatisiertes Fahren in allen Bereichen der Gesellschaft relevant wird. Fest steht, dass die Industrie, vor allem OEM und Tier-1-Zulieferer, und zudem die Wissenschaft mit Nachdruck an der Entwicklung autonomer Fahrzeuge arbeiten.

In abgeschlossenen Bereichen, vor allem bei der Intralogistik bzw. dem innerbetrieblichen Transport, werden bereits seit einigen Jahren fahrerlose Transportsysteme (FTS) eingesetzt. Neben anfänglicher Navigation anhand von Spurmarkierungen auf dem Boden setzen sich inzwischen auch für diesen Einsatzzweck andere Lösungen wie die Triangulation mit Laserscannern oder die Verortung und Navigation durch Referenzpunkte im Raum durch [1].

Aber auch im Straßenverkehr sind erste hochautomatisierte Fahrzeuge ohne Fahrer prinzipiell bereits im Testeinsatz. Für die Zulassung sind allerdings Sicherheitsfahrer notwendig, die im Notfall eingreifen können. Diese prototypischen Fahrzeuge befinden sich an der Schwelle zur Automatisierungsstufe SAE Level 4² und sind meist als People Mover (Abschnitt 4.3) bzw. Shuttle für den Personentransport auf der sogenannten letzten Meile im Einsatz³.

Im Pkw-Bereich sind derzeit teilautomatisierte Fahrzeuge (SAE Level 2) Stand der Technik, die den Fahrer gleichzeitig bei der Längs- und Querführung unterstützen – bspw. durch einen adaptiven Tempomaten mit Abstandskontrolle sowie

einer Spurhalte-Funktion. Erste Fahrfunktionen des SAE Level 3 sind ebenfalls bereits im Einsatz, wobei nur der Fahrer nach Aufforderung aktiv in das Fahrgeschehen eingreifen muss.

Der Sprung von einem automatisierten Fahrzeug mit einem Fahrer (als Rückfallebene) zu einem autonomen Fahrzeug ohne Fahrerplatz ist allerdings groß. Diese Transformation ändert nicht nur das Fahrzeug und dessen Einsatzmöglichkeiten, sondern ist auch eng mit gesellschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen verknüpft:

Zum einen kann ein autonomes Fahrzeug rund um die Uhr eingesetzt und durch Sharing-Ansätze weitaus effizienter genutzt werden als heutige Pkw. Zum anderen stellen sich neue Fragen der Verantwortlichkeiten bei Unfällen autonomer Fahrzeuge und der gesellschaftlichen Akzeptanz bzw. des Vertrauens in diese.

Abbildung 7 fasst in einer Übersicht⁴ zusammen, wie die zeitliche Entwicklung der Automatisierungsstufen in Studien verschiedener Unternehmen, Beratungsfirmen und Forschungseinrichtungen eingeschätzt wird.

Dabei werden nur die SAE Level 2 bis 5 unterschieden, da das SAE Level 1 „Assistenzsysteme“ bereits flächendeckend implementiert ist.

Im Mittel sehen die Studien das Erreichen von vollständig autonomen Fahrzeugen frühestens im Jahr 2030.

² Eine Klassifizierung der SAE Level findet sich in Abschnitt 4.2.

³ Zum Beispiel der autonome Shuttle-Bus der Deutschen Bahn in Bad Birnbach [8].

⁴ Die Übersicht beinhaltet nur eine Auswahl verfügbarer Studien. Außerdem treffen einige Studien nicht zu allen Automatisierungsstufen Aussagen.

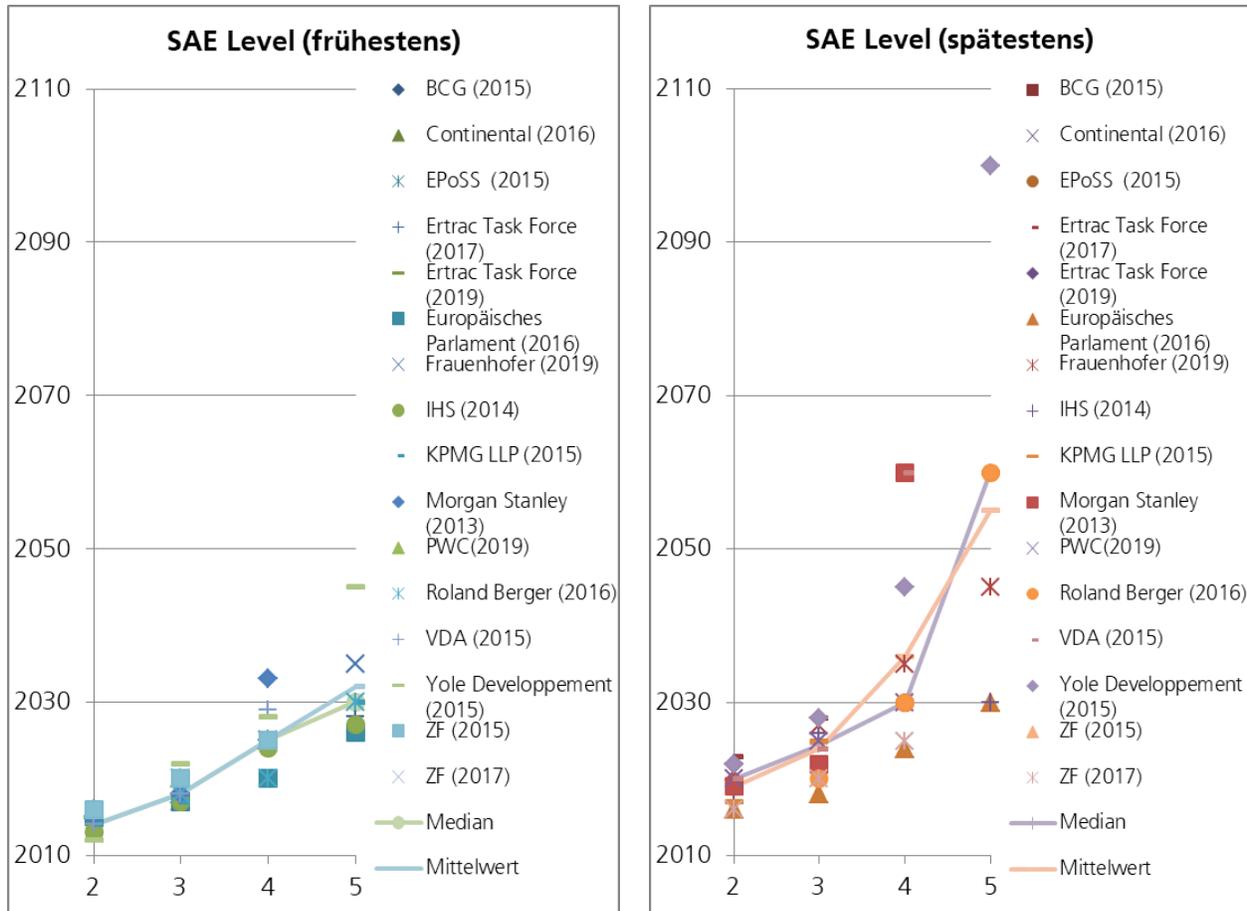


Abbildung 7: Übersicht über Studien zum Markteintritt verschiedener SAE Level bei Pkw mit jeweils frühestem (links) bzw. spätestem (rechts) Einführungsjahr. SAE Level 1 wird als bereits eingeführt betrachtet. (Quelle: eigene Darstellung)

Der späteste Zeitpunkt liegt dagegen ca. 30 Jahre später. Dies veranschaulicht die Unsicherheit mit der diese Aussagen getroffen werden. Eine zuverlässige Einschätzung ist an dieser Stelle nicht möglich, da die Entwicklung von zu vielen Faktoren abhängt.

Stattdessen werden auf den folgenden Seiten zwei mögliche Zukunftswelten beschrieben, wie sich der Bestand automatisierter bzw. autonomer Fahrzeuge entwickeln könnte. Dabei werden zum einen eine konservative Entwicklung und zum anderen eine progressive, d.h. die Einführung autonomer Fahrzeuge begünstigende, Entwicklung angenommen.

Beide Zukunftsbilder basieren auf Erkenntnissen einer Veröffentlichung von Nieuwenhuijsen et al. (2018), die die langfristige Innovationsdiffusion⁵ von automatisierter Fahrzeugtechnologien unter Verwendung der Systemdynamik analysiert [2].

⁵ Die Simulation wurde auf den niederländischen Markt angewandt. Abstrahiert können die Erkenntnisse aber auf Deutschland bzw. Europa übertragen werden. Hierfür wurden die Ergebnisse der Simulation in internen Workshops angepasst.

3.1 Die konservative Welt automatisierten Fahrens.

Abbildung 8 zeichnet einen konservativen Hochlauf automatisierter bzw. autonomer Fahrfunktionen. Diese Entwicklung geht davon aus, dass sich die Funktionalitäten aus SAE Level 2 und 3, die bereits heute zum Teil flächendeckend eingeführt sind, weiter entwickeln und kontinuierlich den Bestand durchdringen werden. Autonome Fahrfunktionen werden dabei lange nur als Nischen- bzw. Testanwendungen zugelassen, da die gesetzlichen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene ungeklärt sind.

Die Verbreitung von teil- bzw. bedingt automatisierten Fahrzeugen kann durch gesetzliche Forderungen nach sicherheitskritischen Funktionen beschleunigt werden. Dies lässt sich beispielsweise bei der Vorgabe für Notbremsassistenten bereits beobachten.

Wenn Komponenten zur Nachrüstung von Fahrzeugen von SAE Level 1 auf Level 2 oder 3 verfügbar wären, könnte der Bestand deutlich schneller automatisiert werden. Dies ist aber technisch nur eingeschränkt möglich: Zum einen sind die Automatisierungsfunktionen aufgrund ihrer Relevanz in Bezug auf die Fahrzeugsicherheit zumeist abgeschlossene Systeme im Fahrzeug. Folglich müsste für die Nachrüstung tief in das Fahrzeugsystem eingegriffen werden.

Zum anderen müssen Sensoren für die Umfeld- erfassung exakt kalibriert werden – bei einer Nachrüstung führt das zu einem deutlichen Mehraufwand.

Reduzieren sich die Kosten für die Hard- und Software signifikant, kann dies dazu führen, dass optionale Assistenzsysteme von Kunden bei einem Neuwagenkauf hinzugefügt werden. Durch die auf diese Weise induzierten Skaleneffekte sinken die Kosten für die Systeme weiter.

Umgekehrt behindern weiterhin hohe Kosten der Automatisierungskomponenten die Durchdringung des Bestands. Beispielsweise werden LiDAR-Systeme von den meisten Herstellern als zwingend erforderlich für SAE Level 3 erachtet – diese sind heute mit einigen Tausend Euro aber noch sehr teuer. Für eine flächendeckende Verbreitung von Fahrzeugen des SAE Levels 3 ist eine deutliche Preissenkung grundlegende Voraussetzung.

Bei SAE Level 3 fungiert der Fahrer nur noch als sogenannte Rückfallebene. Häufen sich Unfälle mit diesen Fahrzeugen, bei denen entweder die Technik versagt oder die Übergabe vom Fahrzeug an den Menschen nicht oder zu langsam funktioniert hat, kann dies ein weiterer Showstopper für komplexe Assistenzsysteme sein.

Wenn vollständige autonome Fahrzeuge parallel zu hochautomatisierten Fahrzeugen technisch machbar und gesetzlich zulassungsfähig werden, ist zu erwarten, dass der Markthochlauf automatisierter Fahrzeuge einen Einbruch erfahren würde. SAE Level 5 Fahrzeuge verdrängen in diesem Fall frühzeitig Fahrzeuge mit geringerem Automatisierungslevel (progressives Zukunftsbild im folgenden Abschnitt).

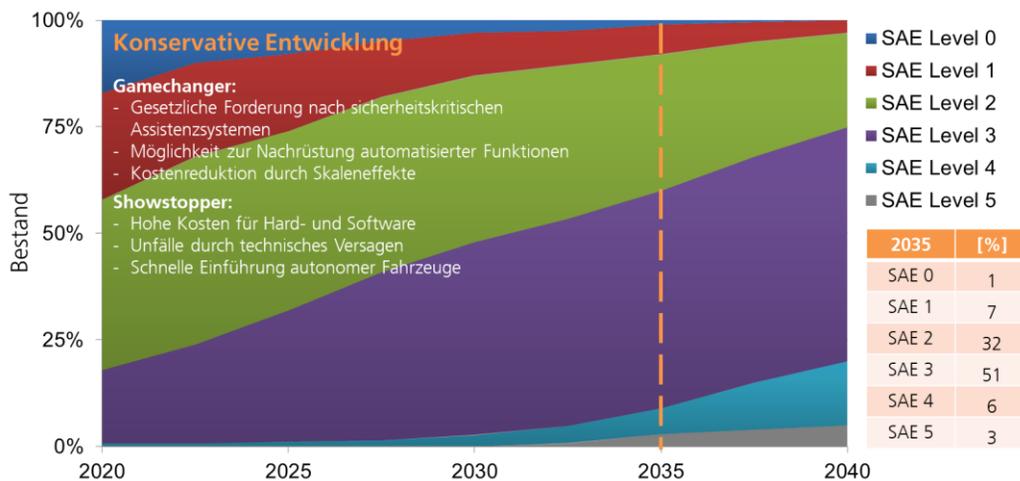


Abbildung 8: Anteile verschiedener Automatisierungsstufen am europäischen Pkw-Bestand – mögliche Zukunftswelt in einer konservativen Entwicklung (Quelle: eigene Darstellung)

3.2 Die progressive Welt automatisierten Fahrens.

Grundannahme dieses in Abbildung 9 dargestellten Szenarios ist die schnelle Entwicklung und Verbreitung autonomer Fahrfunktionen. Bereits 2035 stellen hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge einen Anteil von über einem Drittel der Gesamtflotte. Von Nischenanwendungen mit Sicherheitsfahrern entwickeln sich diese Fahrzeuge schnell zu Serienfahrzeugen mit verschiedenen Einsatzzwecken.

Neben der Substitution nicht-automatisierter Pkw und Nutzfahrzeuge eröffnen sich neue Anwendungsfälle, wie die autonome Lieferung von Gütern während der Nacht oder der On-Demand-Personentransport in Shuttles.

Begünstigende Faktoren für die progressive Entwicklung sind u. a. staatliche Investitionen in den Infrastrukturausbau. Neben der Implementierung einer ausreichenden 5G-Mobilfunkabdeckung mit geringen Latenzzeiten und hohen Bandbreiten unterstützt die Vernetzung der Infrastruktur (Lichtsignalanlagen etc.) ebenso wie die kontinuierliche Aktualisierung von Verkehrs- und Straßendaten die Umsetzung autonomer Fahrfunktionen. Dieser Infrastrukturausbau ist jedoch kostenintensiv und die Frage der Finanzierung noch nicht geklärt.

Ein grundlegendes Geschäftsmodell autonomer Fahrzeuge basiert auf der geteilten Nutzung. Wird der Sharing-Gedanke (Kapitel 1) von den Nutzern verinnerlicht, fördert dies die Einführung auto-

mer Fahrzeuge. Eine Voraussetzung für eine attraktive Umsetzung des Sharing-Gedankens ist dabei, dass die geteilten und autonomen Fahrzeuge nahtlos in das bestehende Transportsystem integriert werden können.

Bisher sind Robotertaxis noch sehr teuer, da sich Hard- und Software in der Entwicklungsphase befinden und bislang keine Skaleneffekte eingetreten sind. Signifikant sinkende Kosten begünstigen eine zügige Akzeptanz autonomer Fahrzeuge.

Der Zulassung autonomer Fahrzeuge stehen neben technischen Herausforderungen noch gesetzliche Hürden bzw. eine unklare Rechtslage in Deutschland im Weg. Solange diese Sachlage nicht geklärt ist, bleibt eine Einführung autonomer Fahrzeuge über Prototypen mit Sondergenehmigung hinaus eine Zukunftsvision.

Dasselbe gilt, wenn keine gemeinsamen Standards für das automatisierte Fahren (vor allem bei der Kommunikation) gefunden werden. Ein Beispiel ist die Entscheidung zwischen WLAN oder 5G-Mobilfunk als Kommunikationsstandard, die in der EU noch aussteht. Im Idealfall sollte es hier eine international einheitliche Regelung geben.

Eine mangelnde Akzeptanz autonomer Fahrzeuge verzögert bzw. verhindert deren Einführung zusätzlich. Diese kann bspw. durch Unfälle aufgrund technischen Versagens entstehen.

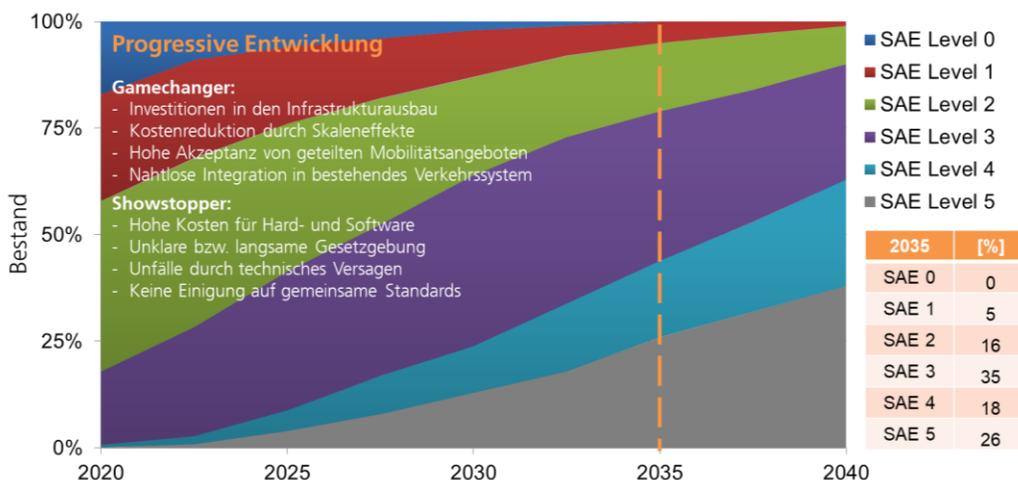


Abbildung 9: Anteile verschiedener Automatisierungsstufen am europäischen Pkw-Bestand – mögliche Zukunftswelt in einer progressiven Entwicklung (Quelle: eigene Darstellung)

4 Entwicklung und Veränderungen der Fahrzeugkonzepte.

Die Trends der Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung verändern die Mobilität nicht nur technologisch, sondern auch in der Art und Weise, wie diese in der Zukunft genutzt und umgesetzt wird.

Dabei wird das Fahrzeug aller Voraussicht nach von der derzeitigen manuellen Steuerung und einem verbrennungsmotorischen Antrieb hin zu einem elektrisch oder alternativ angetriebenen und bei Bedarf automatisiert fahrenden Transportmittel, das ständig mit anderen Fahrzeugen und der Umwelt kommuniziert. Dadurch können auch neue Geschäftsmodelle entwickelt werden, denn der primäre Einsatzzweck, für den ein Fahrzeug derzeit konzipiert wird, verändert sich.

Während die drei oben genannten Technologietrends jeweils individuell das Fahrzeug in bestimmten technologischen Teilbereichen weiterentwickeln, werden vor allem durch die Interaktion und wechselseitige Verstärkung der Trends völlig neue Lösungen und Fahrzeugkonzepte möglich.

Im urbanen Bereich scheint der Trend so zum Beispiel weg vom individuellen, motorisierten Verkehr hin zu einem klimaneutralen, geteilten und multi-modalen Verkehr zu gehen.

Für die Automobilindustrie bedeutet dies, dass neben der Weiterentwicklung bestehender Komponenten auch neue Fahrzeugkonzepte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle entwickelt werden müssen. Klassische Komponenten im verbrennungsmotorischen Antriebsstrang werden voraussichtlich auf den europäischen und globalen Fahrzeugmärkten an Relevanz verlieren.

Im Folgenden werden die Entwicklungen der Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung erklärt und ihr Einfluss auf Fahrzeugkonzepte beschrieben. Die Analyse dient als Ausgangspunkt für die Ableitung relevanter Module und Komponenten für den Technologiekalendar. Zusätzlich werden abschließend auch vollkommen neuartige Fahrzeug- bzw. Mobilitätskonzepte beschrieben, die disruptive Entwicklungen darstellen.

4.1 Effizienzsteigerung im Antriebsstrang: Entwicklungen und Veränderungen relevanter Module und Komponenten.

Das Fahrzeugangebot der Automobilhersteller wurde in den letzten Jahren immer stärker um alternativ betriebene Fahrzeuge ergänzt, die den klassischen verbrennungsmotorischen Antriebsstrang ergänzen oder (in Teilen) ersetzen. Insbesondere durch die Elektrifizierung versprechen sich die Hersteller, die von der EU festgelegten Emissionsgrenzwerte einhalten zu können. Dabei wird eine Vielzahl unterschiedlicher Formen und Grade der Elektrifizierung unterschieden – zum Beispiel in Bezug auf die erzielbare rein elektrische Reichweite sowie auf das technische Zusammenspiel konventioneller und elektrischer Komponenten.

Zur Elektrifizierung zählen nicht nur rein elektrisch fahrende Fahrzeuge (BEV – *Battery Electric Vehicle*), sondern auch alle hybriden Formen (HEV – *Hybrid Electric Vehicle*, PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*, REEV – *Range-extended Electric Vehicle*), die sowohl einen Verbrennungsmotor

(ICE – *Internal Combustion Engine*) als auch einen E-Motor zum Vortrieb nutzen. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCV – *Fuel Cell Vehicle*) zählen zu den elektrifizierten Antriebskonzepten, erzeugen die Antriebsenergie aber im Fahrzeug mit einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle selbst. Gemeinsam ist allen Fahrzeugen, dass Teile oder die gesamte Fahrtstrecke rein elektrisch zurückgelegt werden können. Ein zusätzlicher Verbrennungsmotor wird entweder elektrisch unterstützt oder erzeugt zusätzlich Strom für die Reichweitenverlängerung.

Mit der technologischen Weiterentwicklung im Antriebsstrang verändern sich auch die für den Vortrieb und weitere Funktionen notwendigen Komponenten. Die neuen, modifizierten oder nicht mehr notwendigen Komponenten je Antriebskonzept veranschaulicht Tabelle 1 im Zeithorizont bis 2035.

Tabelle 1: Veränderung der Komponenten für Antriebskonzepte bis 2035, M: modifiziert, E: entfällt, N: neu, n.V.: nicht vorhanden. (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [3])

Komponenten	Antriebskonzepte					
	ICE	HEV	PHEV	REEV	BEV	FCV
Verbrennungsmotor	M	M	M	M	E	E
Starter und Lichtmaschine	M	M	M	M	E	E
Abgasanlage bzw. Luftsystem	M	M	M	M	E	M
Kraftstoffversorgung	M	M	M	M	E	M
Getriebe	M	M	M	M/E	M/E	M/E
Elektr. Antriebsmaschine	n. V.	N	N	N	N	N
Batteriesystem für Antrieb	n. V.	N	N	N	N	N
Leistungselektronik	n. V.	N	N	N	N	N
Ladesystem im Fahrzeug	n. V.	n. V.	N	N	N	n. V.
Brennstoffzellensystem	n. V.	n. V.	n. V.	n. V.	n. V.	N

Die im Rahmen des Technologiekalenders betrachteten Module, Komponenten und Technologien im Bereich Antriebsstrang leiten sich direkt aus den Änderungspotenzialen der unterschiedlichen Entwicklungsstränge alternativer betriebener Fahrzeuge ab und sind in folgender Abbildung dargestellt.

Sie umfassen 29 unterschiedliche Module: vom Verbrennungsmotor inkl. Peripherie, Getriebe und

Wellen über Klimatisierung, Kühlkreisläufe und Thermomanagement bis hin zu E-Maschinen, Batterie-Systemen, der Leistungselektronik und Brennstoffzellen-Systemen inkl. der H₂-Versorgung, -Distribution und -Speicherung.

Auch Syntheseverfahren für synthetische Kraftstoffe werden dargestellt. Die einzelnen Module sind umfassend im „Modulkatalog“ des Technologiekalenders beschrieben.



Abbildung 10: Übersicht über die im Technologiekalender betrachteten Module für die evolutionäre Entwicklung bzw. den elektrifizierten Antriebsstrang. Die Reihenfolge und Farbcodierung entspricht der Darstellung im Modulkatalog (Quelle: eigene Darstellung)

4.2 Vernetztes, automatisiertes und autonomes Fahren: Entwicklungen und Veränderungen relevanter Module und Komponenten.

Neben der Elektrifizierung sind die Automatisierung und die Vernetzung von Fahrzeugen weitere wesentliche Entwicklungstrends. Die Automatisierung von Fahrfunktionen beschreibt die stufenweise Übernahme von Funktionen des Fahrers durch die Maschine bzw. das Fahrzeug selbst.

Die Automatisierung hat dabei verschiedene Ziele: u. a. weniger Unfälle, einen erhöhten Komfort und eine bessere Nutzung der (Fahr-)Zeit. Die Vernetzung ist ein wesentlicher Teilbereich um die Automatisierungsfunktionen zu erreichen.

Nach einer gängigen Einteilung der SAE International (*Society of Automotive Engineers*) werden sechs Automatisierungsstufen unterschieden. Während im SAE Level 0 sämtliche relevanten Fahrfunktionen durch den Fahrer manuell durchgeführt werden, fährt das Fahrzeug im SAE Level 5 in allen Situationen autonom. Tabelle 2 listet die Klassifizierung einzelner SAE Level in einer Übersicht.

Ein automatisiertes Fahrzeug ab SAE Level 2 verfolgt dabei stets den fundamentalen Ansatz, bestehend aus den Komponenten: *Sense, Think, Act* (Abbildung 11). Die Sensoren erfassen dabei die

Umgebung, sind sozusagen die Sinne des Fahrzeugs (*Sense*). Das Gehirn des Fahrzeugs, bestehend aus einer bzw. meist mehreren Recheneinheiten, verarbeitet die Sinneseindrücke in Form von Videobildern oder Punktwolken. Dabei kommen Algorithmen des Bildverstehens und der künstlichen Intelligenz zum Einsatz (*Think*). Im Ergebnis werden Fahrhinweise in Form von Trajektorien an die Aktuatoren übermittelt, die diese in physische Vorgänge umsetzen (*Act*).

Neben den Sensoren am Fahrzeug, bestehend aus Kamera, LiDAR, Radar und Ultraschall, erfassen weitere Technologien wichtige Eingangsdaten. Durch Fahrzeugkommunikation, d. h. Vernetzung der Fahrzeuge untereinander bzw. mit der Infrastruktur oder einer Datencloud, werden Informationen eingespielt, die durch die Sensorik nicht erfasst werden können.

Beispielsweise warnt die Infrastruktur vor einer Gefahrensituation hinter einer Kurve oder ein vorausfahrendes Fahrzeug meldet Glatteis an die nachkommenden Fahrzeuge. Navigationsdaten aus der Inertialsensorik sowie der Trilateration mit Satelliten liefern weitere unverzichtbare Informationen.

Tabelle 2: Einteilung der Automatisierungsstufen nach der Norm SAE J3016

SAE Level	Name	Quer- und Längsführung	Umfelderfassung	Rückfallebene	Bemerkung
0	keine Automation	Fahrer	Fahrer	keine	ABS und ESP können vorhanden sein
1	Assistenzsysteme	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer	Unterstützung bei Längs- oder Querführung
2	Teilautomatisierung	Fahrzeug	Fahrer	Fahrer	Unterstützung durch Längs- und gleichzeitige Querführung
3	bedingte Automatisierung	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrer	Fahrer muss in der Lage sein, einzugreifen
4	Hochautomatisierung	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	autonom unter bestimmten Rahmenbedingungen
5	Vollautomatisierung	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	vollständig autonom in jeder Situation und Umgebung

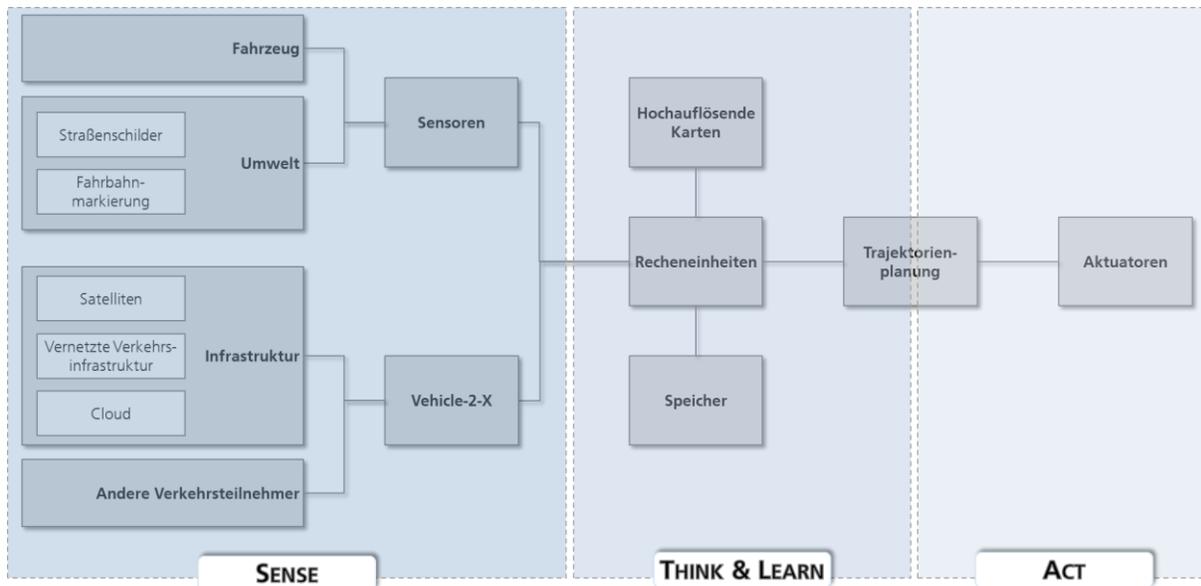


Abbildung 11: Typische Automatisierungsarchitektur (Quelle: eigene Darstellung)

Neben der fahrzeugbasierten Automatisierung, die aktuell vorwiegend verfolgt wird, kann die Automatisierung theoretisch auch in die Infrastruktur verlagert werden. Dieser Ansatz wird im Modulka-
talog näher beschrieben.

Im Rahmen des TKBW wird vorerst aber nur die fahrzeugbasierte Automatisierung und Vernetzung betrachtet. Der infrastrukturseitige Ansatz muss gesondert betrachtet werden, ebenso ist der Software-Bereich nicht Teil der Betrachtung.

Die Zukunftswelten der verschiedenen Automatisierungslevel haben eines gemeinsam: Verschiedene Automatisierungsstufen werden parallel bestehen. Bereits heute gibt es Fahrzeuge bis einschließlich SAE Level 3. Tabelle 3 verknüpft die

Darstellung der SAE Level mit der jeweils benötigten Hardware. Dazu werden die im Technologiekalender betrachteten Module den diversen Automatisierungsleveln zugeordnet. Ab SAE Level 3 sind alle betrachteten Hardware-Module erforderlich. Das heißt, egal welche Zukunftswelt eintritt, die Hardware wird in jedem Fall benötigt.

Je höher der Automatisierungsgrad ist, desto höher sind auch die Anforderungen an die jeweiligen Sensoren und Komponenten (hinsichtlich Reichweite, Latenz, Ausfallsicherheit etc.). Grundsätzlich wird aber für alle SAE Level dieselbe Hardware-Basis benötigt. Tendenziell werden mehr und leistungsstärkere Sensoren benötigt, je höher die Automatisierungsstufe ist.

Tabelle 3: Zusammenhang zwischen Automatisierungskomponenten und SAE Leveln (Einschätzung basierend auf [4]). Über die Modul-Bezeichnung können die entsprechende Roadmaps/Technologien ermittelt werden.

Modul	Modul ID	SAE Level					
		0	1	2	3	4	5
Radar	M36		x	x	x	x	x
LiDAR	M37–M40				x	x	x
Kamera	M41		x	x	x	x	x
Ultraschall	M42		x	x	x	x	x
Aktuatoren	M43		x	x	x	x	x
X-by-Wire	M44		x	x	x	x	x
Satellitenbasierte Navigation	M45		x	x	x	x	x
Weitere Navigationstechnologien	M46		x	x	x	x	x
Langstreckenkommunikation	M47		x	x	x	x	x
Kurzstreckenkommunikation	M48				x	x	x
Fahrzeuginterne Kommunikation	M49	x	x	x	x	x	x

Die im Rahmen des Technologiekalenders betrachteten Module, Komponenten und Technologien im Bereich Automatisierung und Vernetzung sind in folgender Abbildung 12 dargestellt.

Sie umfassen 12 unterschiedliche Module: Von der Sensorik inkl. Radar, LiDAR, Kamera- und Ultraschallsystemen über Komponenten zur Umsetzung

und Positionierung bis hin zu Kommunikationstechnologien.

Ein Exkurs im Bereich Mikrosystemtechnik schließt die Darstellung ab. Die einzelnen Module sind im „Modulkatalog“ des Technologiekalenders beschrieben.



Abbildung 12: Übersicht über die im Technologiekalendar betrachteten Module für Automatisierung und Vernetzung (Quelle: eigene Darstellung)

4.3 Exkurs: Ausblick auf zukünftige Entwicklungen bei Fahrzeugkonzepten.

Die Technologietrends der Elektrifizierung und Automatisierung haben die bestehenden Straßenfahrzeugkonzepte in gewissen Bereichen verändert, gänzlich neue Konzepte sind dadurch aber bislang nicht entstanden. Vielmehr werden die beiden Trends für sich genommen das Fahrzeugangebot diversifizieren, nicht aber durch gänzlich neuartige Fahrzeugkonzepte ersetzen.

Einzelne Komponenten könnten aber sehr wohl substituiert werden, zum Beispiel der verbrennungsmotorische Antriebsstrang durch einen elektrifizierten) oder die menschliche Fahrzeugsteuerung durch eine maschinelle Steuerung (autonomes Fahren, bisher jedoch nur zum Teil verfügbar).

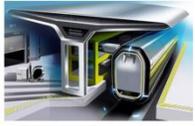
Ein reines Substitutionsprinzip ist für eine nachhaltige Verbesserung der Verkehrssituation und Umweltbelastung vor allem in urbanen Gebieten aber nicht ausreichend. Stattdessen muss der öffentliche Personenverkehr attraktiver und effizienter werden (inklusive einer konsequenten Multimodalität). Zudem sollten Flächenverbrauch, Lärmbelastung

und Umweltverschmutzung minimiert werden. Dazu werden sowohl in der Wissenschaft als auch vonseiten der Industrie immer wieder Vorschläge für neue, disruptive Fahrzeugkonzepte gemacht.

Allen vorgestellten Konzepten gemein ist die Bemühung, eine ganzheitliche Antwort auf die steigende Verkehrsnachfrage, vor allem in Städten, und damit einen Beitrag zum Klimaschutz zu finden.

Neben straßengebundenen Konzepten werden auch Neuerungen auf der Schiene, zu Wasser, in der Luft und unter der Erde verfolgt, wobei die meisten neuen Konzepte deutlich im Straßenfahrzeugbereich liegen. Hier soll vor allem der urbane Wirtschaftsverkehr für Personen und Güter transformiert werden. Folgende Tabelle 4 beschreibt verschiedene Entwicklungen von Fahrzeugkonzepten in unterschiedlichen Bereichen.

Tabelle 4: Übersicht über neue Fahrzeugkonzepte (Bildquellen: Webseiten der Unternehmen bzw. wissenschaftliche Einrichtungen)

Bereich	Beschreibung
Auf der Straße	Entwicklung vom <i>Conversion Design</i> zum <i>Purpose Design</i> für zweckoptimierte Fahrzeuge. Dabei vor allem <i>People Mover</i> und <i>Cargo Mover</i> aber auch modulare Fahrzeuge. Außerdem vermehrt Kleinstfahrzeuge der Klasse „Light Electric Vehicle“, die ein gutes Nutzlast-Fahrzeuggewicht-Verhältnis haben.
	     <p>Navya Shuttle (Mover) EasyMile EZ10 (Mover) DLR U-Shift (Modular) Mercedes-Benz Vision Urbanetic (Modular) Schaeffler Bio-Hybrid (LEV)</p>
Auf der Schiene	Flexible, günstige und komfortable Konzepte für Güter- und Personentransport. Multimodale Umschlagplätze sollen die Attraktivität erhöhen.
	  <p>DLR NGT HST DLR NGT Terminal</p>
In einer Röhre	Röhrenbasierte Systeme über oder unter der Erde: entweder „herkömmlicher“ Tunnel in dem Fahrzeuge selbst oder auf Carrier fahren (vertikale Verlagerung des Verkehrs) oder Transportsysteme in evakuierten Röhren für sehr schnellen Transport.
	   <p>Smart City Loop Hyperloop Boring Company</p>
Zu Wasser	Modulare „Anhänger“ an das Zugschiff (schwimmender Zug)
	 <p>Wärtsilä</p>
in der Luft	„Vertical Take-off and Landing“-Konzepte für urbanen Personentransport oder Paketzustellung
	    <p>Lilium Volocopter DHL Paketkopter Amazon Prime Air</p>

Im Bereich der straßengebundenen Fahrzeugkonzepte (Fokus TKBW) werden derzeit vor allem *People Mover* intensiv entwickelt, zum Teil sind sie bereits auch im Einsatz. *People Mover* werden in der Regel mit einer batterieelektrischen Antriebseinheit ausgestattet und fahren zum Teil bereits autonom – allerdings auf definierten Strecken

(SAE Level 4). Diese Tür-zu-Tür-Shuttles sind speziell für den Transport von Personen in Städten konzipiert, haben daher meist einen seitlichen Einstieg und kombinieren Sitz- und Stehplätze. Ihr Anwendungsfall sieht die Kombination mit anderen urbanen Transportmitteln wie S- und U-Bahnen vor.

Cargo Mover werden als Pendant speziell für den Gütertransport auf der letzten Meile entwickelt. Für einen effizienten Rund-um-die-Uhr Einsatz werden die Konzepte für den autonomen Einsatz entwickelt.

Einige der *Mover*-Konzepte basieren auf einem modularen Ansatz, d.h. es werden möglichst viele Gleichteile eingesetzt, so dass am Ende der Produktionslinie nur noch das Fahrwerk mit entweder der Personen-Kapsel oder der Güter-Kapsel „verheiratet“ werden muss.

Die *Light Electric Vehicles* fahren ebenfalls elektrisch, von einer aufwändigen Automation wird hierbei aber in aller Regel abgesehen, da diese zum einen zu viel Energie verbrauchen und zum anderen den Fahrzeugpreis signifikant erhöhen würde.

Als weitere wesentliche Entwicklung, deren Reifegrad aber weniger weit fortgeschritten ist, sind die *on-the-road*-modularen Fahrzeugkonzepte zu nennen: Bei diesen bleibt auch nach Verlassen der Produktionsfabrik die Transporteinheit von der Fahreinheit getrennt. Standardisierte Aufnahmesysteme erlauben es der Fahreinheit, verschiedene

Transportkapseln auch während des Betriebs auf der Straße aufzunehmen.

Während einige Ansätze, wie bspw. *microSnap* von Rinspeed, zusätzliche Infrastruktur für den Wechsel benötigen, setzen andere Konzepte auf vollkommene Flexibilität (bspw. U-Shift von DLR, *Snap* von Rinspeed oder *Vision Urbanetic* von Mercedes Benz). Dabei wird das Wechselsystem entweder in die Fahreinheit oder in die Kapseln integriert.

Die *on-the-road*-modularen Konzepte können dadurch auch während des Betriebs ihren Einsatzzweck ändern, wodurch die komplexe, ressourcenintensive und teure Fahreinheit sehr effizient eingesetzt werden kann. Das Geschäftsmodell des *Mobility*- oder *Logistics-as-a-Service* bildet dabei in der Regel den Rahmen, in dem die Fahrzeuge operieren.

Es wird deutlich, dass die straßengebundenen, neuartigen Fahrzeugkonzepte in Zukunft auf elektrifizierte Antriebsstränge (Batterie oder Wasserstoff) basieren und vor allem im Wirtschaftsverkehr autonome Konzepte verfolgt werden.

5 Die Standortperspektiven für Baden-Württemberg.

Auf die Veränderungen im Automobil müssen sich die Unternehmen des baden-württembergischen Automobilclusters mit ihren Produkten einstellen.

Ansetzen können sie dafür bei ihren Produktionskompetenzen, mit denen sie bei den konventionellen Produkten den seit Jahrzehnten anhaltenden Strukturwandel der Branche bewältigen.

Perspektive 1: Eigene Kompetenzen für neue Produkte der Elektromobilität nutzen.

Das erste Fallunternehmen ist eine börsennotierte AG, deren Hauptprodukte Kunststoffteile und metallische Verbundstoffe sind, die bisher im Antriebsstrang bei Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. An das Unternehmen wurde ein Problem aus der Batteriefertigung für Elektrofahrzeuge herangetragen: Die Batteriezellen müssen im Batterieblock elektrisch verbunden werden. Die dazu geplanten metallischen Verbindungselemente konnten den hohen Strömen und Temperaturen nicht standhalten.

Die bisherigen Verbrennungsmotor-Produkte sind hohen Umwelteinflüssen ausgesetzt, die durch den Einsatz metallischer Verbundstoffe bewältigt werden. Das Unternehmen hat für diese konventionellen Produkte aus den eigenen Kompetenzen heraus ein Fertigungsverfahren entwickelt und sich damit eine marktbeherrschende Stellung erarbei-

Die im Folgenden vorgestellten drei Praxisbeispiele verdeutlichen, wie aus einer Analyse der eigenen Standortkompetenzen heraus neue Produktions- und Produktkonzepte entstehen können.

tet. Nun stellte sich die Frage, inwieweit diese Fertigungskompetenz auch für die Anforderungen im Zusammenhang mit E-Mobility-Produkten genutzt werden kann.

In einer unternehmensinternen Arbeitsgruppe aus Fertigungstechnolog*innen, Entwickler*innen, Produktionsexpert*innen und Werkzeugbauer*innen wurde schnell deutlich, dass hierfür verfahrenstechnisches Neuland betreten werden muss. Deshalb wurden externe Expert*innen von verbundenen Universitäten und Maschinenbauunternehmen in Baden-Württemberg hinzugezogen.

Innerhalb von drei Monaten konnte dem Kunden eine technisch anspruchsvolle Lösung angeboten werden. Das Fallunternehmen ist seitdem Alleinanbieter der entsprechenden Produkte.

Perspektive 2: Produktionskompetenzen für Zukunftsprodukte weiterentwickeln.

Im zweiten Fallbeispiel geht es um ein Produktionswerk eines Automobilzulieferers. Im Werk werden derzeit Motorkomponenten aus Kunststoff-Spritzguss produziert.

Auf Initiative der Arbeitnehmer*innenvertretung im Aufsichtsrat des Konzerns organisierte der Vorstand Standortentwicklungsprojekte. Deren Ziel ist es, Produktionswerke mit starker Abhängigkeit vom Verbrennungsmotor auf neue Aufgaben hin zu entwickeln. An einem beispielhaften Standort wurde ein Konzept zur Entwicklung einer Standortstrategie umgesetzt, das als Handlungsempfehlung insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen in Kapitel 5.2.1 beschrieben wird. Dabei zeigte sich im ersten Schritt, dass das Produktionswerk mit hohen Lean-Kompetenzen und

den hohen Fertigungskompetenzen im Kunststoffspritzguss sehr effizient und flexibel produzieren kann.

Ein Abgleich dieser Kompetenzen mit den Zukunftsherausforderungen zeigte aber, dass sich die Fertigungstechnologie im Bereich Kunststoffverarbeitung in den letzten Jahren weit über die am Standort angewandten Verfahren des Kunststoffspritzens weiterentwickelt hat. Sogenanntes *High-Performance-Plastic* (HPP) wird mit völlig neuen Fertigungsmethoden hergestellt.

Am Standort kam ein Technologie-Arbeitskreis aus den Standorttechnolog*innen, Maschineneinsteller*innen und Beschäftigten zusammen. Sie recherchierten Informationen zu den neuen Techno-

logien, stellten Kontakt zu den einschlägigen Hochschulen her und besuchten zwei Maschinenbauunternehmen, die sich bereits mit dem Thema befassen.

In der Abstimmung mit der F&E-Abteilung des Konzerns stellte sich heraus, dass aktuelle Produktstudien aus der Grundlagenforschung genau

auf diese HPP-Materialien setzen. Im Zusammenspiel der am Standort weiterentwickelten Produktionskompetenz und der F&E-Abteilung entstanden in den letzten beiden Jahren in einem internationalen Projektteam drei neue Zukunftsprodukte, die jetzt den Kunden in der Automobilindustrie angeboten werden.

Perspektive 3: Neue Produktoptionen im Technologiekalender Baden-Württemberg finden.

Das dritte Fallbeispiel befindet sich aktuell noch in der Umsetzung des Standortanalysekonzeptes. Hier zeigt sich, dass die Technologiesteckbriefe aus dem Technologiekalender die Standortentwicklungskonzepte positiv unterstützen können.

Bei dem Fallbetrieb handelt es sich um ein Produktionswerk eines größeren Zulieferunternehmens, das metallische Einzelteile für den Verbrennungsmotor herstellt. Die Kompetenzanalyse brachte auch hier eine spezifische Fertigungskompetenz zutage: Einzelne Motorkomponenten werden zur Gewichtsreduktion mit einem technisch anspruchsvollen Langlochbohrverfahren ausgehöhlt und mit speziellen Füllmaterialien zur thermischen Stabilitätssicherung ausgefüllt.

Beim Abgleich der Standortkompetenzen mit den Zukunftsherausforderungen wird das Standortteam nun den Technologiekalender einsetzen. Insbesondere der Steckbrief „T022 Wellen“ kann hier wichtige Hinweise für passende Zukunftsprodukte liefern. Die hier dargestellten Hohlwellen für unterschiedliche Einsatzgebiete könnten ideal mit den Fertigungstechnologien des Standorts zusammenpassen.

Im nächsten Schritt müssen nun in enger Zusammenarbeit von Standort-Fertigungstechnolog*innen und F&E-Bereichen konkrete Produktideen entwickelt werden.

5.1 Die Standortkompetenz in Baden-Württemberg.

Baden-Württemberg ist ein weltweit wichtiger Automobilstandort und mit einem Jahresumsatz von 107 Milliarden Euro wird rund ein Viertel des deutschen Branchenumsatzes hier erwirtschaftet. Der Branchenkern – die Fahrzeugindustrie mit Herstellern und Zulieferern – ist eine der baden-württembergischen Schlüsselbranchen: fast ein Drittel des Industrieumsatzes und etwa die Hälfte der industriellen F&E-Ausgaben zählen zu dieser Branche.⁶

Noch deutlicher wird die Bedeutung bei Betrachtung des gesamten Automobilclusters, zu dem neben den Fahrzeugherstellern und Automobilzulieferern auch der Maschinenbau, Teile- und Komponentenzulieferer aus anderen Branchen, (Entwicklungs-) Dienstleister und das Kfz-Gewerbe

gehören. Insgesamt kann für das gesamte Automobilcluster Baden-Württembergs von insgesamt etwa 470.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten ausgegangen werden, das ist gut ein Zehntel aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten. [5]

Insgesamt beruht die Stärke des Automobilclusters auf seiner Entwicklungs- und Innovationsleistung, in der Innovationen am Fahrzeug eng mit Kompetenzen in dessen industrieller Produktion verknüpft sind.⁷ Die Fahrzeughersteller (OEM – Original Equipment Manufacturer) sind auf das in den letzten Jahren stark wachsende Premiumsegment spezialisiert. Mit den hier erwirtschafteten Renditen werden nicht zuletzt Innovationen in der Produktion und am Fahrzeug finanziert [6]. Außer-

⁶ Das belegen regelmäßig Veröffentlichungen des Statistischen Landesamts Baden-Württemberg, beispielsweise [11], [12], [13], [14].

⁷ Etwa 40 % der Industrieinvestitionen in Baden-Württemberg entfallen allein auf den Fahrzeugbau, der mit pro Kopf-Investitionen von fast 24.500 EUR auch die höchste Innovationsintensität in Baden-Württemberg hat. [16]

dem tragen mittlerweile die Zulieferer einen Anteil von etwa drei Vierteln der Branchenwertschöpfung bei. Auch sie sind mit eigenen Entwicklungszentren an Fahrzeuginnovationen beteiligt und erschließen darüber hinaus Kostenvorteile für die Hersteller durch Produktionsverlagerungen in Länder mit niedrigerem Lohnniveau [6].

Die weltweit tätigen Unternehmen des Clusters begegnen der Globalisierung und der zunehmenden Regionalisierung der Weltmärkte durch den Aufbau von Produktions-, Entwicklungs- und Vertriebsstandorten auf allen Kontinenten.

Im Gegensatz zu anderen Clustern der Automobilindustrie vertreten die baden-württembergischen Unternehmen eine umfassende Wertschöpfungskette von der Produktentwicklung über die Teileproduktion bis hin zur Endmontage, hier sind auch Unternehmenszentralen mit weltweit tätigen Vertriebs- und Servicezentren ansässig. Zudem haben sich Unternehmen des baden-württembergischen Maschinen- und Anlagenbaus auf Produktionsmittel für die Automobilindustrie spezialisiert. Das gilt insbesondere für die Ausrichtung auf den Antriebsstrang im Verbrennungsmotor, auf dem ein Schwerpunkt der Automobilzulieferindustrie liegt (ca. 40 % des Umsatzes bzw. der Beschäftigten).

5.2 Die Herausforderungen der Transformation in der Automobilindustrie.

Die Stärken müssen in der aktuellen Transformation auf die Elektromobilität und das autonome Fahren überführt werden, um den wirtschaftlichen Erfolg auch fortzuführen. Gleichzeitig ergeben sich daraus die besonderen Herausforderungen für die baden-württembergischen Unternehmen:

- Die Ausrichtung auf das Premiumsegment hat bisher zum Erfolg der baden-württembergischen Automobilindustrie geführt und eine Innovationsstrategie finanziert, bei der Fahrzeuginnovationen erst zeitlich verzögert in preissensible Marktsegmente mit niedrigeren Margen übernommen wurden.

Bei elektrifizierten Antriebskonzepten und insbesondere bei batterieelektrischen Fahrzeugen gilt es derzeit, die aktuellen Batteriekapazitäten und die damit verfügbare Leistung über möglichst effiziente Fahrzeuge in eine hohe Fahrleistung und hohen Komfort für die Fahrenden umzusetzen. Das ist im Premiumsegment mit eher schweren Fahrzeugen technisch herausfordernd.⁸

- Der Wandel zu elektrischen Antrieben führt zu deutlichen Verschiebungen in der bisherigen Wertschöpfungskette. Beispielhaft dafür sind die Diskussionen um eine eigene Batteriezellenfertigung durch deutsche OEM und Zulieferer, aber auch die Auseinandersetzungen um die Fertigung von Elektroantrieben an Produktions-

standorten von Verbrennungsmotoren wie bei Daimler in Untertürkheim.

- In der Vernetzung der Fahrzeuge und im assistierten bzw. autonomen Fahren sehen Hersteller und Zulieferer Wertschöpfungspotenziale, die geringere Arbeitsumfänge und Wertschöpfungsrückgänge bei (batterie-)elektrischen Fahrzeugen abfangen könnten. Außerdem bietet Software Renditechancen durch ihre hohe Skalierbarkeit. Hier stehen aber klassische OEM und Zulieferer in starker Konkurrenz zu IT-Konzernen.

Innovationszyklen beim Produkt belaufen sich bisher auf einen Zeitraum von sieben bis acht Jahren von der Entwicklung neuer Komponenten über den Bau entsprechender Produktionsanlagen bis hin zum Start der Serienproduktion, sodass Modellwechsel bei Kraftfahrzeugen deutlich länger als die kürzeren Versionszyklen bei Software oder anderen Produkten der Informations- und Kommunikationstechnologien dauern.

- Eine weitere Herausforderung für die klassische Automobilindustrie liegt in der Frage der Datenspeicherung und -nutzung: Mit zunehmender Digitalisierung und Vernetzung erzeugen Fahrzeuge immer mehr Daten, in deren Auswertung für Instandhaltung, Service und Mobilitätsdienstleistungen neue Geschäftsmöglichkeiten gesehen werden (Smart Data).

⁸ So wurden 2018 in Deutschland nur 80 Fahrzeuge der Mercedes Benz B-Klasse mit Elektroantrieb zugelassen, aber 6.756 Elektro-Smarts und 6.360 Renault Zoe [17].

Ebenfalls offen ist die Frage, ob beim autonomen Fahren die „Rechenleistung“ überwiegend in den Fahrzeugen erbracht wird oder ob

diese durch „intelligente Infrastruktur“ gesteuert werden - und wo dementsprechend Umsatzpotenziale liegen. Hier entsteht zudem große Konkurrenz durch IT-Konzerne wie Google, die sowohl beträchtliche Datenmengen verarbeiten können als auch bereits über breite Zugänge zu Daten und große Datenmengen verfügen.

Um diesen neuen Konkurrenzen zu begegnen, gründen die OEM und Zulieferer der klassischen Automobilindustrie neue Gemeinschaftsunternehmen und Forschungsallianzen in ganz neuen Konstellationen (z. B. Volkswagen mit Amazon oder Daimler und BMW mit der Zusammenlegung ihrer Sharing-Angebote).

Je nach Geschwindigkeit der Marktdurchdringung bringt die Transformation zur Elektromobilität Elemente eines disruptiven Technologiewechsels mit sich, weil der Elektromotor den Verbrennungsmotor ersetzt.

Dagegen laufen Automatisierung und Vernetzung eher als inkrementeller Innovationspfad ab, bei dem sich das Fahrzeug durch zusätzliche Funktionen verändert⁹.

Abbildung 13 stellt die wesentlichen Einflüsse auf das Automobil-Cluster Baden Württemberg dar.



Abbildung 13: Das baden-württembergische Automobilcluster im Strukturwandel
(Quelle: eigene Darstellung)

⁹ Das gilt unter der Annahme, dass das Verkehrsverhalten mit dem hohen Anteil des motorisierten Individualverkehrs mittelfristig erhalten bleibt.

5.2.1 Handlungsempfehlung: Entwicklung von Standortstrategien zur Absicherung von (Produktions-)Standorten.

Das baden-württembergische Automobilcluster stützt sich auf das spezifische Innovationsmuster der „produktionswissensbasierten Produktinnovation“ [5] [7]. Erhalt und Ausbau der Wettbewerbsstärke der baden-württembergischen Automobilbranche können nur gelingen, wenn deren Innovationsführerschaft auch in der Elektromobilität hergestellt wird und erhalten bleibt. Dazu ist eine Aktualisierung der F&E-Excellence auf die neuen Themen Elektroantrieb, Batterie und Digitalisierung genauso notwendig wie der Erhalt und der Ausbau von Produktionserfahrung in den neuen Produkten des elektrischen Antriebsstrangs. Die Transformation der vom Verbrennungsmotor abhängigen Produktionswerke, insbesondere der Automobilzulieferer, wird damit zum wichtigen Erfolgsfaktor einer gelungenen Transformation des gesamten Automobilclusters.

Die Unternehmen stehen vor der Schwierigkeit, derzeit mit Verbrennungsmotorkomponenten gut ausgelastete Produktionswerke auf neue Zukunftprodukte auszurichten, die aktuell am Markt noch wenig nachgefragt werden. Außerdem sind aufgrund des disruptiven technologischen Wandels zum Elektroantrieb in den nächsten Jahren noch technologische Innovationssprünge zu

erwarten, sodass heute nur schwierig eingeschätzt werden kann, welche Produkte und welche Produktkomponenten in fünf bis zehn Jahren am Markt nachgefragt werden.

Die am Beginn des Kapitels genannten aktuellen betrieblichen Beispiele zeigen, wie das dargestellte spezifische Innovationsmuster der „produktionswissensbasierten Produktinnovation“ für eine erfolgreiche Transformation zur Elektromobilität genutzt werden kann. Dabei geht es darum, die Kompetenzen an den Produktionswerken als Basis der eigenen Produktinnovationen zu nutzen. So können eigenständige Standortstrategien im Unternehmen entwickelt werden. Dabei sind vier Arbeitsphasen zu beobachten:

1. Analyse der eigenen Betroffenheit durch die Transformation,
2. Entwicklung eines Standort-Kompetenzprofils,
3. Ableitung von Zukunftspotenzialen für die Standortentwicklung sowie
4. Ableitung konkreter Maßnahmen zur Umsetzung der Standortstrategie.



Abbildung 14: Arbeitsschritte einer Standortstrategie (Quelle: eigene Darstellung)

5.2.2 Erster Schritt: Betroffenheitsanalyse.

Zu den ersten Überlegungen gehört die Ermittlung, wie stark das Unternehmen mit seinen Produkten und Dienstleistungen von der Transformation des Fahrzeugs hin zur Elektromobilität bzw. zum automatisierten Fahren betroffen ist.

In diesem Zusammenhang muss eingeschätzt werden, wann neue Produkte die bisherigen ablösen könnten. Besonders relevant ist das insofern für den Wandel vom Verbrennungsmotor zur Elektromobilität, als hier aufzunehmen ist, in welchem Anteil der Umsatz oder die Beschäftigung vom Antriebsstrang und insbesondere von den verschiedenen Antriebskonzepten (Verbrennungsmo-

tor, Hybridantriebe, Elektroantriebe oder Brennstoffzellen) abhängen.

Dem derzeitigen Stand werden Szenarien zum Wandel gegenübergestellt, aus denen sich die Veränderung des Umsatzes und die voraussichtlichen Zeitspannen für diesen Wandel abschätzen lassen.

Als Einstieg in ein gemeinsames Problembewusstsein kann diese Abschätzung als Workshop der Geschäftsführung beispielsweise mit Fertigungs- und Vertriebsverantwortlichen oder dem*der Betriebsratsvorsitzenden durchgeführt werden

TIPP

Dieser Workshop kann regelmäßig – also beispielsweise jährlich – wiederholt werden, um die eigene Strategie auf neue Szenarien der Marktdurchdringung oder Veränderungen der Rahmenbedingungen (z. B. eine weitere Verschärfung der Flottengrenzwerte oder Zulassung von Assistenzfunktionen höherer SAE-Stufen) anzupassen.

5.2.3 Zweiter Schritt: Standort-Kompetenzprofil.

Außerdem bewerten die betrieblichen Expert*innen die Standort-Kompetenzen in unterschiedlichen Dimensionen. Dabei geht es beispielsweise um spezifische fertigungstechnische Kompetenzen, um Agilität der Produktion, Lean- und GPS-Kompetenzen, Wirtschaftlichkeit und die spezifischen Innovations- und Leitwerksrollen der Werke.

Das Selbstbild der Standort-Expert*innen wird idealerweise einem Fremdbild von Kunden oder aus indirekten Konzernabteilungen gegenübergestellt. Aus der Differenz der Einschätzungen von Eigen- und Fremdbild können sich Entwicklungspotenziale ergeben.

5.2.4 Dritter Schritt: Zukunftspotenziale des Standorts.

Aus der Kompetenzanalyse werden dann die Zukunftspotenziale des Standorts abgeleitet. Dazu werden die Zukunftstrends der bestehenden Produkte sowie die der Fertigungstechnologien, Produktoptionen für Elektromobilität oder automatisiertes Fahren sowie die Anforderungen an die Innovationsrolle des Standorts aufgenommen.

Die Roadmaps und Technologiesteckbriefe des Technologiekalenders bieten hierfür mögliche Anhaltspunkte. Hieraus ergeben sich dann konkrete Maßnahmen, um den Standort auch zukünftig zu erhalten: So kann die Weiterentwicklung des bestehenden Produktportfolios aus dem Einsatz

aktueller Fertigungstechnologien bei zusätzlichen Produkten oder der Erschließung weiterer Marktsegmente bestehen. Eine weitere Integration von Elektronikbauteilen könnte eine zusätzliche Option für bestehende Produktportfolios sein. Geprüft wird auch systematisch, ob neue Produkte für Antriebskonzepte der Elektromobilität gefertigt werden können, wie Gehäuse für Batterien oder Leistungselektronik oder Komponenten außerhalb des Antriebsstrangs.

Die Kompetenzanalyse schärft auch den Blick dafür, ob die eigene Fertigungstechnologie weiterentwickelt werden muss, um die Position als Zulie-

ferer mit einer hohen Prozesskompetenz abzusichern.

Eine hohe Innovationsfähigkeit ist eine wesentliche Grundlage für den Standorterhalt im Strukturwandel. Auch hier ergeben sich Hinweise aus der

Kompetenzanalyse, ob beispielsweise der Ausbau des *Simultaneous Engineering* oder die Umsetzung von Industrie 4.0-Konzepten die Innovationsrolle stärkt. Daraus können konkrete betriebliche Maßnahmen abgeleitet werden, die dem Standorterhalt dienen.

5.2.5 Vierter Schritt: Maßnahmen zur Umsetzung der Standortstrategie.

Aus den gesamten Analyseergebnissen werden in einem Potenzialworkshop am Standort schließlich Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Standortkompetenzen und zum Aufbau neuer Zukunftskompetenzen entwickelt. Wichtig ist hier, dass neben der Weiterentwicklung der konventionellen Produkte auch Ansätze der Transformation zu Zukunftsprodukten entstehen.

So konnten zum Beispiel in einigen Unternehmen Technologiearbeitskreise etabliert werden, die sich mit neuen Produktionstechnologien beschäftigten. Solche Transformations-Labore und Experimentierfelder können einen Umstieg auf neue Zukunftsprodukte zwar nicht garantieren, erhöhen aber die Zukunftschancen für die nachhaltige Entwicklung der Produktionswerke deutlich.

6 Der Technologiekalender als Leitfaden durch den technologischen Wandel.

6.1 Lesehilfe für den Technologiekalender.

Die zentrale Frage für Unternehmen bzw. Unternehmer*innen im Strukturwandel ist die nach zukunftsfähigen Produkten, die sie auf Basis ihrer Fertigungskompetenzen anbieten können. Das gilt insbesondere für baden-württembergische Unternehmen, deren Wettbewerbsvorteil vor allem in der industriellen Serienfertigung innovativer Pro-

dukte besteht. Gleichzeitig ist gerade für kleine und mittlere Unternehmen schwierig einzuschätzen, wie das Automobil in der Überlagerung technischer Optionen, der Einhaltung von Klimazielen und gesellschaftlicher Veränderungen zukünftig aussehen wird.

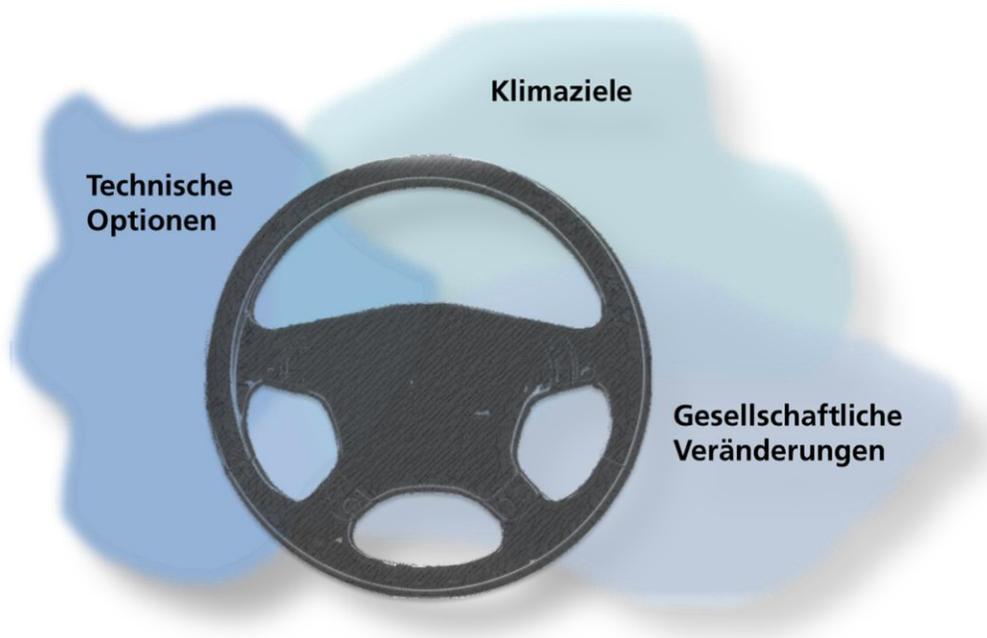


Abbildung 15: Überlagerung von technischen Optionen, Klimazielen und gesellschaftlichen Veränderungen
(Quelle: eigene Darstellung)

Hier bietet der Technologiekalender Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg Orientierungshilfe, indem

- der **Leitfaden** die wesentlichen Veränderungen und die Herausforderungen für die baden-württembergische Automobilindustrie zusammenfasst und eine Lesehilfe für die drei Elemente des Technologiekalenders gibt,
- der **Modulkatalog** für 44 Module einen Überblick über die zeitliche Entwicklung des Tech-

nologiereifegrads (TRL) und des Herstellungsreifegrads (MRL) in Roadmaps zusammenfasst und

- die **Technologiesteckbriefe** für 148 einzelne Technologien neben einer kurzen Beschreibung die jeweiligen Vorteile, Hemmnisse für die Einführung, Einsatzbereiche, Leistungsbereiche und Kompetenzanforderungen darstellt.

Der Technologiekalendar unterstützt die in Kapitel 5 dargestellte Entwicklung von Standortstrategien. Je nach Ausgangslage kann er auf mehreren Wegen eingesetzt werden:

- Sie wollen sich einen Überblick verschaffen, welche zeitliche Entwicklung für zentrale Module im Antriebsstrang oder für das automatisierte Fahren erwartet werden?
 - ▶ Der **Modulkatalog** fasst die Perspektive für 44 Module in kurzen Darstellungen und Roadmaps zusammen.
- Ausgehend von den Kompetenzen Ihres Unternehmens suchen Sie Anregungen, welche neuen Produkte zukünftig in Fahrzeugen verwendet werden?
 - ▶ Über die Suche nach Kompetenzen finden Sie in den **Technologiesteckbriefen** mögliche neue Produkte und eine zeitliche Einordnung des Technologiereifegrads sowie des Herstellungsreifegrads bis 2035.

- Sie wollen künftige Technologiepfade abschätzen?
 - ▶ Der **Leitfaden** mit der Darstellung der Treiber und Szenarien der technischen Entwicklung unterstützt Sie dabei, anhand zukünftiger Entwicklungen selbst Technologiepfade abzuschätzen und Folgen für ihre eigene Unternehmensstrategie abzuleiten.

6.1.1 Handhabung des Modulkatalogs.

Die Reduktion antriebsbedingter CO₂-Emissionen und das automatisierte Fahren sind die beiden zentralen Veränderungen des Fahrzeugs in den nächsten Jahren. Die dafür wichtigsten Komponenten/Module werden im Modulkatalog kurz beschrieben. Es folgt eine Roadmap, die die erwartete Entwicklung der Technologie- und Herstellungsreifegrade einzelner Technologien in dem

jeweiligen Modul bis ca. 2035 darstellt. Außerdem folgt eine Auswertung der weltweiten Patentanmeldungen der jeweiligen Technologien, in der global und für Deutschland diejenigen Unternehmen aufgeführt werden, die im jeweiligen Betrachtungszeitraum die meisten Patente angemeldet haben.

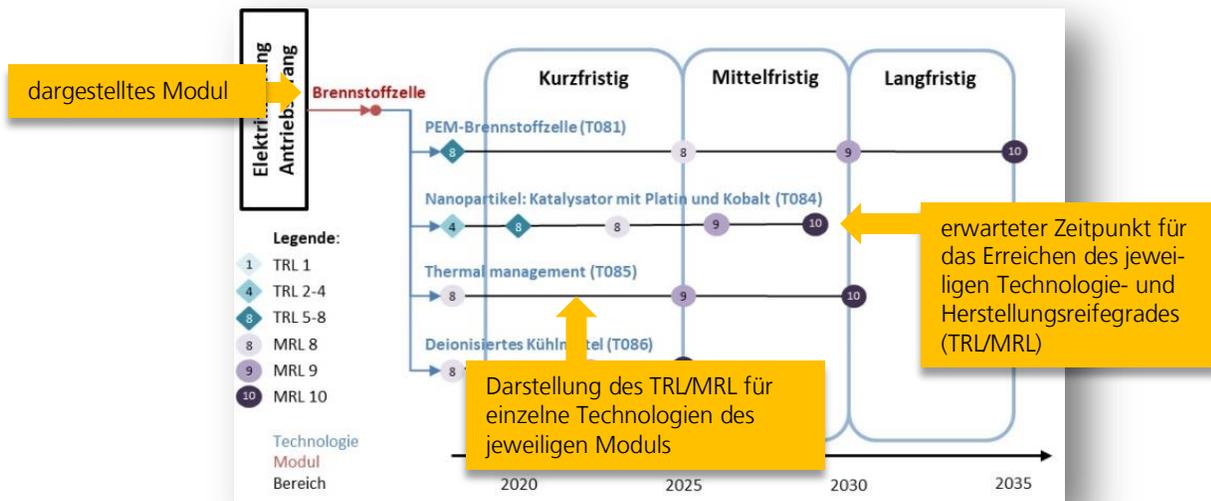


Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Roadmap im Modulkatalog (Quelle: eigene Darstellung)

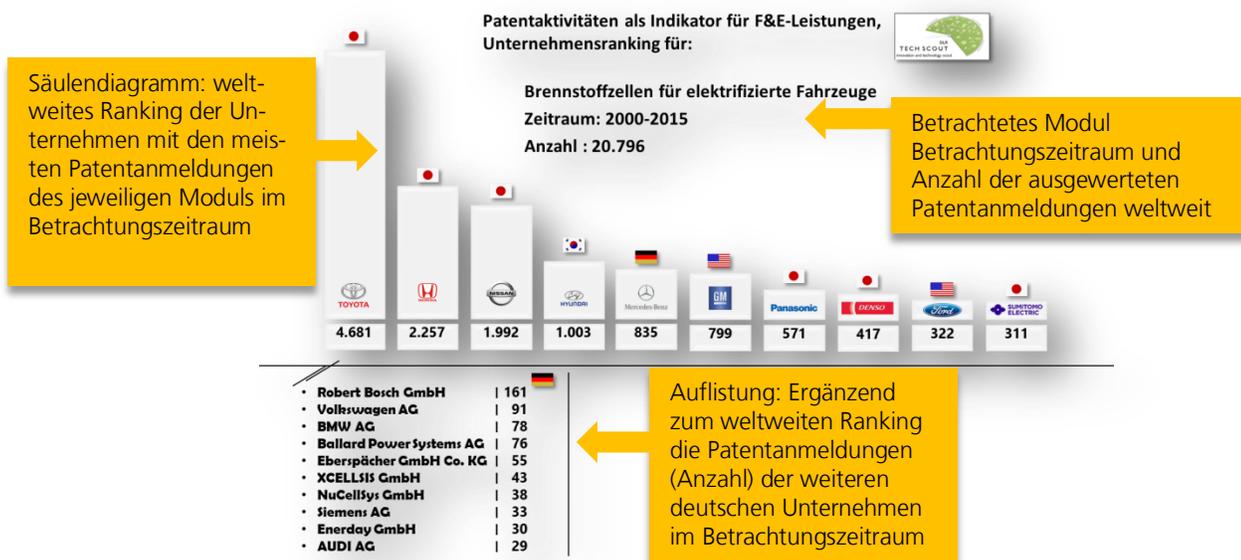


Abbildung 17: Schematische Darstellung einer Patentanalyse im Modulkatalog (Quelle: eigene Darstellung)

6.1.2 Handhabung der Technologiesteckbriefe.

Die für die Module identifizierten Technologien werden in den Technologiesteckbriefen einzeln beschrieben. Ebenfalls dargestellt werden die Vorteile der neuen gegenüber älteren oder alternativen Technologien, Hemmnisse bei der Einführung, konkurrierende Technologien, Einsatzbereiche und gegebenenfalls weiterführende Informationen.

Über die Volltextsuche können Sie gezielt über Schlagworte und Kompetenzen nach Technologien suchen, die zukünftig Ihr Produktportfolio ergänzen können. Zum Überblick gibt es am Anfang der Veröffentlichung jeweils eine zusammenfassende Kompetenz- und Schlagwortliste.

Technologietitel, -ID und Modulzuordnung → **Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle**
(1, 81; Brennstoffzelle)

Kurzbeschreibung, Vorteile und Ziele → **Kurzbeschreibung**
Die PEM-Brennstoffzelle stellt die führende Antriebs-Technologie für Wasserstoff-Fahrzeuge dar. Die auf einem niedrigen Temperaturniveau (80°C) arbeitende Brennstoffzelle kann schnell gestartet und dynamisch betrieben werden. Nachteilig ist der Bedarf an notwendigen Edelmetalle als Katalysatoren. Die Entwicklungstätigkeiten fokussieren auf eine weitere Erhöhung der Zell-Stabilität und die Hebung von Kostensenkungspotenzialen. Eine Substitution teurer Rohstoffe sowie die Automatisierung bzw. der Aufbau Serien-Fertigung bieten Kostensenkungspotenziale.

Einführungshemmnisse → **Hemmnisse der Einführung**
Die heute sind der Brennstoffzellen-Fahrzeugmarkt und die notwendige Infrastruktur noch unzureichend vorhanden, die Technologiekosten nicht wettbewerbsfähig. Allerdings bestehen in mehreren Ländern (China, Japan, Norwegen etc.) Zielvorgaben für die Einführung der Brennstoffzellenmobilität bis 2030. Ein entsprechendes Marktwachstum wird erwartet.

Zeitliche Entwicklung der Reifegrade → **Zeitliche Entwicklung**

	TRL1	TRL2-4	TRL5-8	MRL8	MRL9	MRL10
			<2018	2025	2030	2035

Einsatzbereiche und konkurrierende Technologien → **Konkurrierende Technologien**
Batterieelektrische Mobilität
Hybridisierung mit Verbrennungsmotor

Relevante Leistungsparameter der Technologie → **Einsatzbereich**
Einsatz im PKW aber auch im Lastverkehr, Bussen und im Schienenverkehr bevorzugt, auf Grund höherer Reichweitenerfordernis.

Relevante Leistungsparameter der Technologie → **Leistungsparameter**
Toyota Mirai: 3,1 kW/Liter Bauvolumen
Hyundai H2-LKW: 190 kW

Kompetenzen und Schlagworte → **Weiterführende Informationen**
Marktübersicht zu Fahrzeugen, Infrastruktur und aktuellen Entwicklungen findet sich beim Branchenportal H2.live

Kompetenzen und Schlagworte → **Zuordnung zu Kompetenzen**
Montage; Elektrochemie; Kunststoffverarbeitung; Metallbearbeitung; Chemie; Verfahrenstechnik

Angaben zur Verifikation durch Experten und Quellen → **Schlagworte**
Brennstoffzelle
alternativer Antrieb

Quellen: Die Informationen sind durch Fachexperten verifiziert; Forschungsverbund erneuerbare Energien, Forschungsziele 2019, 2018; Oliver Ehret, Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen, 2018; Andreas Brinner u.a., Technologiebericht 4.1 Power-to-Gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojektes TF_EnergieWende, 2017; Julian Hoffmann, 1.000 Wasserstoff-Trucks für H2 Energy, 2018; Toyota, Die Mobilitätsrevolution kommt auf die Straße, 2014.

Abbildung 18: Beispielhafter Technologiesteckbrief (Quelle: eigene Darstellung)

TIPP

Alle drei Bestandteile des Technologiekalenders Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg finden Sie unter www.tkbw.de

6.2 Methodisches Vorgehen bei der Erstellung des Technologiekalenders.

Zunächst wurden relevante Technologien zu den bereits zuvor erarbeiteten Fahrzeugmodulen in den Themenfeldern Elektromobilität, automatisiertes Fahren und Digitalisierung/ Konnektivität identifiziert. Zudem wurden Technologie-Streckbrief-Templates bzw. Fragebögen erstellt, die die Grundlage für die Experten-Umfrage darstellten. Daraufhin wurden projektexterne Technologie-Expert*innen in den jeweiligen Themenfeldern und Technologien für die Durchführung der Studie ermittelt.

Schwerpunkt der Expert*innen-Beteiligung war die Einschätzung zu den Technologie- und Herstellungsreifegraden der einzelnen Technologien. Im Rahmen der ersten Delphi-Runde wurden 169 nationale und internationale Expert*innen mit einer fachspezifischen Auswahl der Fragebogen kontaktiert. Für 123 der 148 Technologien konnten die Einschätzungen der Expert*innen erhoben werden. Der Technologiekalender profitiert maßgeblich von der wertvollen Unterstützung durch diese Experten.

Aufgrund des Umfangs und der mitunter sehr detaillierten Fragebögen, mussten einige Experten aber auch von einer Teilnahme an der Delphi-Befragung absehen. Neben Absagen wegen Zeitmangels wurde insbesondere aus Unternehmen

auch auf die strategische Relevanz, fehlende Freigaben und die hohe Dynamik der technologischen Entwicklung hingewiesen.

Zum Abschluss der ersten Delphi-Runde wurde für jede Technologie ein initialer Steckbrief erstellt, der eine interne Feedbackschleife durch das TKBW-Projektteam durchlief. Anschließend wurde die zweite Delphi-Runde durchgeführt. Die Technologie-Expert*innen wurden erneut in Form von Telefoninterviews sowie Umfragen eingebunden, um die Technologie-Steckbriefe zu kommentieren.

Auf Basis der Expertenrückmeldungen der Delphi-Runde wurden die Steckbriefe für jede Technologie überarbeitet. Abschließend wurden die Technologie-Steckbriefe durch das TKBW-Projektteam finalisiert.

In drei Stakeholder-Workshops und einem Webinar wurde das Konzept des Technologiekalenders mit seinen drei Säulen (Leitfaden, Modulkatalog, Technologie-Steckbriefe), die Auswahl der Module sowie die Darstellung der Ergebnisse mit Vertreter*innen aus Unternehmen und branchennahen Einrichtungen diskutiert, um bereits während der Projektlaufzeit Anregungen der Adressat*innen aufzunehmen.

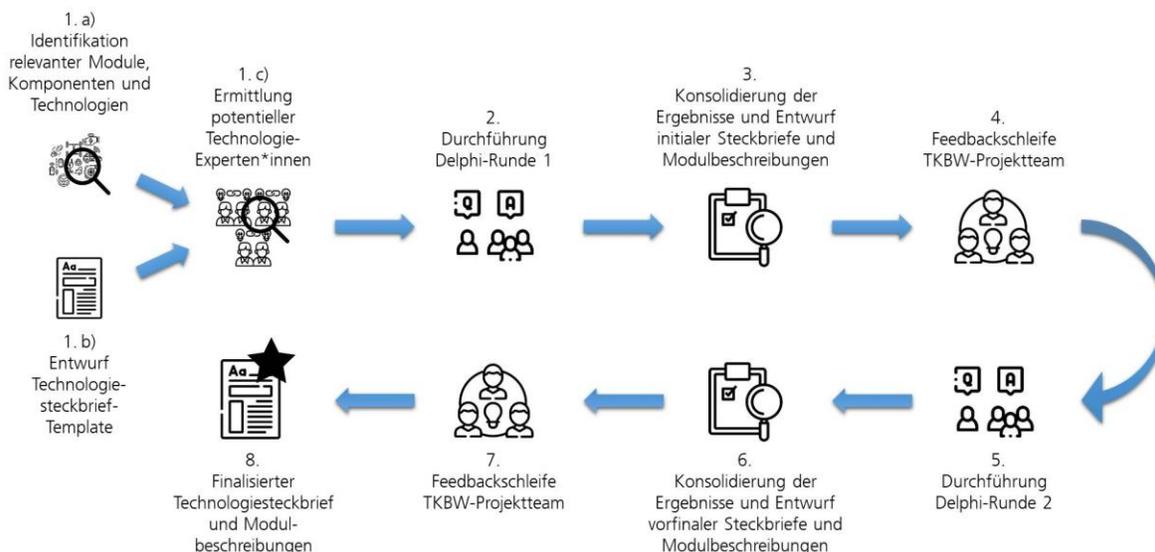


Abbildung 19: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens bei der Erstellung des Technologiekalenders (Bildquelle: eigene Darstellung mit Symbolen von Flaticon, Icons designed by Freepik, Payungkead, Surang, Pixel Perfect, Payungkead, Phatplus, Good Ware and Smashicons from Flaticon)

7 Schlussbemerkung.

Der Technologiekalendar Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg (TKBW) beschreibt die Entwicklungen relevanter Komponenten bzw. Module und Schlüsseltechnologien im Fahrzeugbereich mit einem Zeithorizont bis 2035. Die Darstellung zukünftiger Entwicklungen ist naturgemäß stets mit Ungewissheit behaftet und stellt eine Extrapolation heutiger Erwartungen und Kenntnisse dar.

Die Automobilbranche sieht sich mit Trends bzw. Umbrüchen konfrontiert, welche die Branche verändern. Aus den Entwicklungen in anderen Branchen, wie zum Beispiel der Kamera- oder Smartphone-Industrie, ist zu lernen, dass Veränderungen auch disruptiv ablaufen können. Technologische Entwicklungen und neue Funktionen haben hier die gesamte Branche verändert, mit zum Teil radikalen Folgen für bestehende Produkte und Wertschöpfungsprozesse.

Externe gesellschaftliche Megatrends oder globale Krisen, wie zum Beispiel aktuell im Jahr 2020 die COVID-19-Pandemie, können nicht nur einzelne Branchen, sondern gesamte Wirtschaftsräume vor Herausforderungen stellen, ggfs. sogar externe Schocks auslösen. Politische Rahmenbedingungen wiederum beeinflussen die gesellschaftliche, marktliche und technologische Entwicklungsrichtung auf nationaler oder internationaler Ebene.

Der Technologiekalendar betrachtet derartige nur schwierig vorhersehbare Ereignisse nicht. Vielmehr beschreibt er die aus heutiger Sicht zu erwartende Entwicklung der Technologielandschaft in der Automobilindustrie für die nächsten 15 Jahre, ausgehend vom aktuellen Stand der Technik auf Basis absehbarer, möglichst wahrscheinlicher Entwicklungen.

Die Identifikation von 44 Schlüsselmodulen und 148 Einzeltechnologien basiert dabei ebenso wie die inhaltliche Beschreibung und die zeitliche Entwicklung der technologischen und produktionstechnischen Reifegrade auf den Aussagen und Einschätzungen von Fachexpert*innen in den jeweiligen Bereichen. Neben der erstmals umfassenden Darstellung verschiedener Entwicklungen aus

Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung in Technologie-Roadmaps, ist die Kombination aus Technologie- (TRL) sowie Herstellungsreifegraden (MRL) neu. Die Technologien sind dabei als Nachschlagewerk über Kompetenzen sowie Schlagworte zugänglich. Damit erhalten kleine und mittlere Unternehmen mit dem Technologiekalendar ein Werkzeug, um neue Technologien anhand bestehender Kompetenzen zu identifizieren und, darauf aufbauend, strategische Optionen zur Geschäftsfeldentwicklung abzuleiten.

Zukunftswelten für elektrifizierte und automatisierte Fahrzeuge verdeutlichen im Leitfaden, welche Module in Zukunft besonders relevant sein könnten. Einige Module können insofern als „No-Regret“-Bereiche beschrieben werden, als sie in allen Zukunftswelten von Bedeutung sind.

Die grafische Darstellung der Roadmaps dient der übersichtlichen Visualisierung möglicher Technologieoptionen und kann als Diskussionsgrundlage in KMU genutzt werden. Die zeitliche Entwicklung der Reifegrade beruht auf der aktuellen Einschätzung und den Kenntnissen ausgewählter Expert*innen aus 2019. Diese ist nicht abschließend und sollte in regelmäßigen Abständen überprüft, aktualisiert und erweitert werden.

Durch eine kontinuierliche Überprüfung kann außerdem sichergestellt werden, dass neue Technologien aufgenommen und weniger relevante Entwicklungen gekennzeichnet werden. Weitere Bereiche, die im aktuellen Stand nicht erfasst werden konnten, können zukünftig in den Technologiekalendar eingepflegt werden: Unter anderem sind dies Fahrzeugarchitektur, Software, Infrastruktur und Nutzfahrzeuge.

Der TKBW ist ein methodisch erarbeiteter Technologiekatalog, der systematisch relevante Informationen für schwerpunktmäßig kleine und mittelständische Unternehmen in Baden-Württemberg zugänglich macht. Das gewählte Format erlaubt es zudem, diesen fortlaufend zu ergänzen und zu aktualisieren.

Literaturverzeichnis.

- [1] T. Schmidt, Innerbetriebliche Logistik, Springer Vieweg, 2019.
- [2] J. Nieuwenhuijsen, G. H. d. A. Correia, D. Milakis, B. van Arem und E. van Daalen, „Towards a quantitative method to analyze the long-term innovation diffusion of automated vehicles technology using system dynamics,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 86, pp. 300-327, Januar 2018.
- [3] Fraunhofer, DLR e.V. und IMU Institut, „ELAB - Wirkungsanalyse alternativer Antriebskonzepte am Beispiel einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion,“ Stuttgart, 2012.
- [4] Yole Développement, „Sensors and Data Management for Autonomous Vehicles,“ 2015.
- [5] Strukturstudie BWe mobil 2019. Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung, Stuttgart: e-mobil BW, 2019.
- [6] M. Schwarz-Kocher, M. Krzywdzinski und I. (. Korflür, Standortperspektiven der Automobilzulieferindustrie. Die Situation in Deutschland und in Mitteleuropa unter dem Druck veränderter globaler Wertschöpfungsstrukturen., Düsseldorf: Hans Böckler Stiftung, 2019, p. 161.
- [7] M. Schwarz-Kocher und S. Stieler, „Die Bedeutung regionaler Wertschöpfungscluster der Automobilindustrie im Prozess fortschreitender Globalisierung und der Transformation zur Elektromobilität,“ *Arbeits- und Industriosozologische Studien*, Nr. 2, pp. 35-56, 2019.
- [8] Deutsche Bahn und Ostbayernbus, „Erste autonome Buslinie Deutschlands,“ 2020. [Online]. Available: https://www.ostbayernbus.de/ostbayernbus/view/angebot/buslinien/autonomer_bus.shtml. [Zugriff am 10 03 2020].
- [9] Strukturstudie BWe mobil 2015. Elektromobilität in Baden-Württemberg., Stuttgart: e-mobil BW, 2015b.
- [10] Elektromobilität weltweit. Baden-Württemberg im internationalen Vergleich., Stuttgart: e-mobil BW, 2015a.
- [11] VDA, [Online]. Available: www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/allgemeines.html. [Zugriff am 18 2 2020].
- [12] Statistische Berichte Baden-Württemberg. Produzierendes Gewerbe, Stuttgart: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019, p. 64.
- [13] R. Einwiller, „Innovationsindex 2018: Baden-Württemberg im europäischen Vergleich.,“ *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg*, p. 7, 01 2019.
- [14] R. Einwiller, „Forschung und Entwicklung in Baden-Württemberg - Zukunft gestalten,“ *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg*, p. 29, 11+12 2018.
- [15] J. Dispan, A. Koch und T. König, Strukturbericht Region Stuttgart 2019. Schwerpunkt Mobilitätsdienstleistungen, Stuttgart und Tübingen: IMU und IAW, 2019, p. 82.
- [16] E. Heinze, „Industrieinvestitionen in Baden-Württemberg 2017 erneut auf Rekordniveau,“ *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg*, pp. 38-39, 11+12 2018.
- [17] „Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umweltmerkmalen. Jahr 2018,“ Kraftfahrt-Bundesamt , Flensburg, ohne Jahr.