



TECHNOLOGIEKALENDER

Strukturwandel Automobil
Baden-Württemberg

Modulkatalog

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

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 der Herausgeber 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.

Einführung in den Modulkatalog

Der Technologiekalender Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg bietet insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen Orientierung, indem er

- in einem Leitfaden die wesentlichen Veränderungen und die Herausforderungen für die baden-württembergische Automobilindustrie zusammenfasst,
- in dem hier vorliegenden Modulkatalog für 44 Module einen Überblick über die zeitliche Entwicklung des Technologiereifegrads (TRL) und Herstellungsreifegrads (MRL) darstellt und
- in 148 Technologiesteckbriefen die einzelnen Technologien kurz beschreibt und die jeweiligen Vorteile, Hemmnisse für ihre Einführung, Einsatzbereiche, Leistungsbereiche sowie Kompetenzanforderungen ihrer Produktion darstellt.

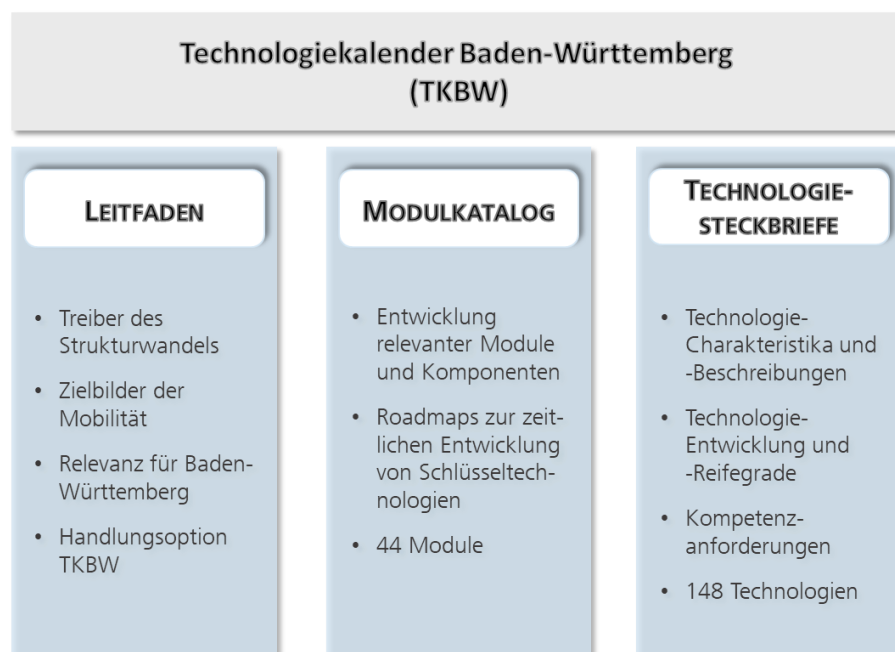


Abbildung 1: Projektergebnisse – die drei Säulen des Technologiekalenders
(Quelle: eigene Darstellung)

Der hier vorliegende Modulkatalog stellt für insgesamt 44 Module und Komponenten eines Fahrzeugs (Fokus: Pkw) die zeitliche Entwicklung zugehöriger relevanter Technologien in Form sogenannter Roadmaps dar. Die Erkenntnisse basieren auf dem Stand der Forschung im Jahr 2019 und sollten regelmäßig an zukünftige Entwicklungen angepasst werden. Die weiteren Projektergebnisse (Leitfaden, Technologiesteckbriefe) stehen unter www.tkbw.de zur Verfügung.

Die Verringerung der Emissionen als zentrales politisches Ziel im Klimaschutz führt zu Veränderungen im Antriebsstrang konventioneller Fahrzeuge und zur Entwicklung gänzlich neuer Antriebskonzepte. Neben der fortgesetzten Optimierung des Verbrennungsmotors für weitere Kraftstoffeinsparungen stehen alternative Antriebskonzepte für hybride, batterieelektrische, mit Wasserstoff sowie mit synthetischen Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge im Fokus. Zudem führt die Entwicklung hin zu (hoch)automatisiert und autonom fahrenden Fahrzeugen zu weiteren Veränderungen in der Wertschöpfung der Fahrzeuge durch zusätzliche Funktionalitäten, Komponenten und Module.

So werden im Folgenden beispielsweise auch die Module der Umfelderkennung, Positionierung, Kommunikation und Datenverarbeitung und die dort jeweils zugehörigen Technologien beschrieben.

Ausgewählt wurden die Module nach ihrer Bedeutung für die Wertschöpfung des Antriebsstrangs und für automatisierte/autonome Fahrfunktionen, da technologische Entwicklungen in diesen Bereichen im derzeitigen Strukturwandel die größte Relevanz besitzen und bestehende Komponenten verändern, erweitern oder gar ganz ersetzen.

In den folgenden Darstellungen werden die jeweiligen Module, ihre grundlegende Funktion und Bedeutung im Fahrzeug sowie erwartbare technologische Entwicklungen kompakt erklärt und beschrieben. Die erwartete Entwicklung einzelner, jeweils dem Modul zugehöriger Technologien bis 2035 wird in Form von Technologiereifegraden (*Technology Readiness Level, TRL*) und Herstellungsreifegraden (*Manufacturing Readiness Level, MRL*) grafisch dargestellt und in einer Roadmap zusammengefasst.

Diese erstmalige Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Reifegrade basiert auf Delphi-Befragungen und Einschätzungen von Fachexpert*innen – sie stellen den zentralen Mehrwert der Analysen dar und liefern konkrete Ansatzpunkte, wann welche Technologie erstens technologisch ausgereift und zweitens massenherstellungsfähig ist. Beides in Kombination führt zu einem möglichen Produktangebot im genannten Zeitraum. Eine Aussage wiederum, ob dann auch eine Produkt-Markt-Kombination möglich ist (also ein mögliches Produkt Kundenbedürfnisse in einem bestimmten Markt befriedigt), kann damit nicht getroffen werden.

Erläuterung und Definition der TRL- und MRL-Reifegrade erfolgen auf der nächsten Seite. Die den jeweiligen Modulen zugehörigen Einzeltechnologien werden im dritten Element des TKBW – den Technologiesteckbriefen – detailliert beschrieben.

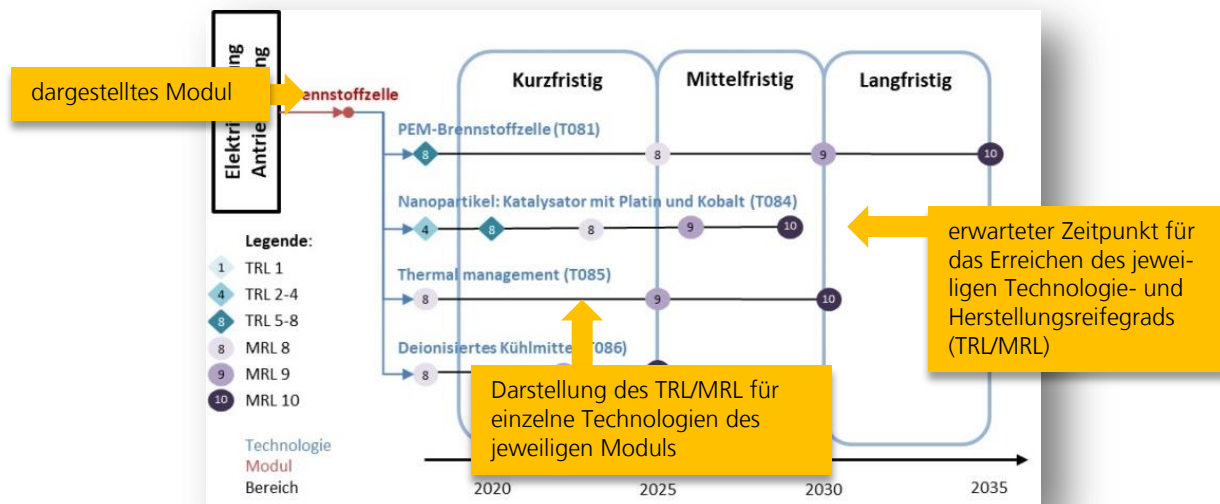


Abbildung 2: Lesehilfe zur Darstellung der Roadmaps (Quelle: eigene Darstellung)

Überdies wurden die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten (F&E) für jedes Modul analysiert, um KMU Hinweise zu technologisch besonders aktiven Unternehmen und Institutionen bzw. Technologieführern bereitzustellen zu können. Als Indikator für F&E-Aktivitäten wird hierbei die Anzahl der Patentanmeldungen im Zeitraum der letzten ca. 15 Jahre herangezogen. Die jeweilige Suchstrate-

gie zu den Modulen und Technologien basiert auf einer Kombination aus IPC-Klassen und Suchbegriffen, um eine bestmögliche Eingrenzung der Ergebnisse auf die Sektoren Verkehr und Energie zu erzielen.

Die Auswertung der weltweiten Patentanmeldungen der jeweiligen Technologien wurde in der Datenbank des Europäischen Patentamts vorgenommen. Aufgeführt werden zu jedem Modul – sofern möglich – die Top Ten der Patentanmelder weltweit in einer Säulendarstellung sowie ergänzend die weiteren deutschen Unternehmen (außerhalb der Top Ten), die im jeweiligen Technologiebereich aktiv sind.

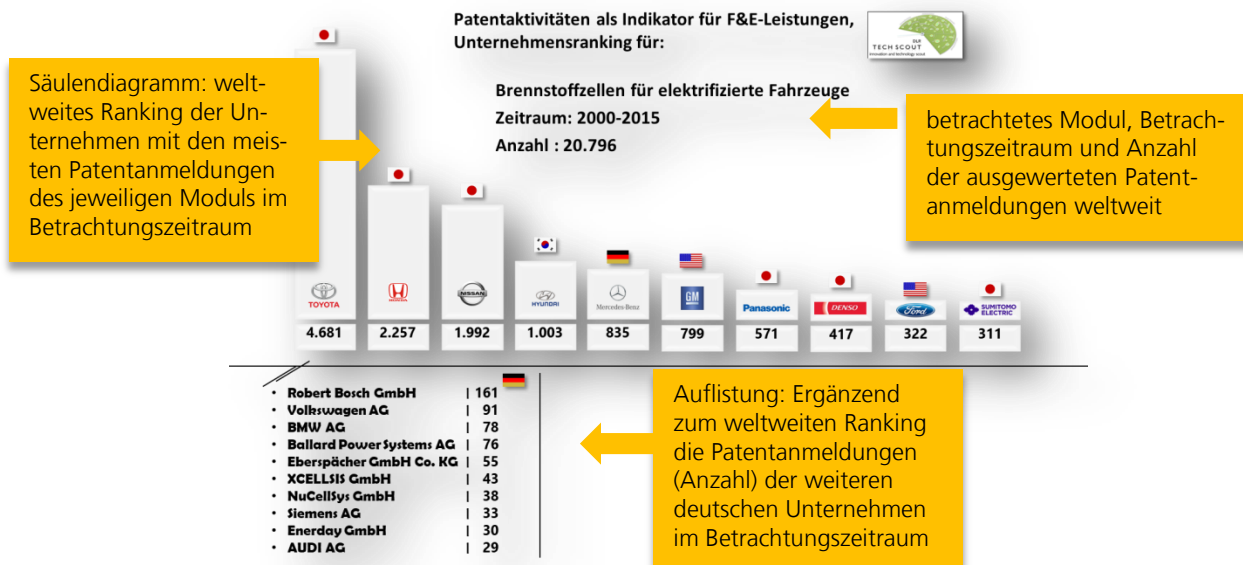


Abbildung 3: Lesehilfe zur Darstellung der Patentanalysen (Quelle: eigene Darstellung)

Erläuterung der Reifegrade TRL und MRL

Die Erläuterung der *Technology Readiness Level* (TRL) bzw. der *Manufacturing Readiness Level* (MRL) basiert auf der Klassifikation der NASA¹ und des Automotive Council UK². Die Reifegrade beziehen sich ab TRL5-8 auf den automobilen Einsatz. MRL-Reifegrade sagen nichts darüber aus, ob die Technologie am Markt erfolgreich ist bzw. sein wird, sondern bestimmen lediglich, wie weit deren Produktionsfähigkeit vorangeschritten ist.

TRL1: Grundlagenforschung

- Die naturwissenschaftlichen Grundprinzipien wurden beobachtet.
- Wissenschaftliche Forschung wurde durchgeführt.
- Die Leistungsparameter wurden vorhergesagt.

TRL2-4: Technologische Forschung

- Die Technologiekomponente und/oder das Basissubsystem wurde/n in der Labor- oder Testumgebung validiert.
- Das Grundkonzept wurde in anderen Branchen als der Automobilbranche (z. B. Luft- und Raumfahrt oder Konsumgüter) umgesetzt.
- Anforderungen und Wechselwirkungen mit relevanten Fahrzeugsystemen wurden ermittelt.

TRL5-8: Produktdemonstration

- Die Test- und Demonstrationsphase ist abgeschlossen.
- Die Technologie hat sich in ihrer endgültigen Form und unter den erwarteten Bedingungen bewährt.
- Die Leistungsparameter wurden bestätigt.

MRL8: Erstproduktion

- Fertigungsprozess im Pilotmaßstab wurde aufgebaut und demonstriert.
- Vorbereitung zur Herstellung in Einzel- oder Kleinserienfertigung.
- Herstellungs- und Qualitätsprozesse sowie -verfahren haben sich in der Produktionsumgebung bewährt.
- Erste Lieferbeziehungen sind etabliert und stabil.

MRL9: Massenproduktionsfähigkeit nachgewiesen

- Herstellung erfolgt in Einzel- oder Kleinserienfertigung.
- Die Fähigkeit zur Massenproduktion wurde nachgewiesen.
- Die wichtigsten Merkmale des Systemdesigns sind stabil und haben sich in Test und Auswertung bewährt.
- Es stehen Materialien zur Verfügung, um die geplanten Massenproduktionspläne einzuhalten.
- Fertigungsprozesse und -verfahren sind etabliert.

MRL10: Erfolgreiche Massenproduktion bewährt

- Die vollständige Serienproduktion wurde demonstriert.
- Konstruktionsänderungen beschränken sich auf Qualitäts- und Kostenverbesserungen.
- Systeme und Komponenten befinden sich in Serienfertigung und erfüllen alle Anforderungen an Technik, Leistung, Qualität und Zuverlässigkeit.
- Alle Materialien, Herstellungsverfahren, Prüf- und Testgeräte sind in der Produktion und werden in der Qualitätssicherung überwacht.

¹ Siehe https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf (abgerufen am: 11.03.2020).

² Siehe <https://www.smmmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/Automotive-Technology-and-Manufacturing-Readiness-Levels.pdf> (abgerufen am: 11.03.2020).

Übersicht zu betrachteten Modulen

1	Entwicklungen im Antriebsstrang	9
1.1	Entwicklungen des Verbrennungsmotors	10
1.1.1	Verbrennungsmotor	11
1.1.2	Verbrennungsmotor – Luftversorgung	13
1.1.3	Verbrennungsmotor – Abgasanlage	15
1.1.4	Verbrennungsmotor – Einspritzanlage	17
1.1.5	Verbrennungsmotor – Zündanlage	19
1.1.6	Motorsteuergeräte	21
1.1.7	Starter-Generator	23
1.1.8	Getriebe	25
1.1.9	Wellen	27
1.1.10	Klimatisierung	29
1.1.11	Fahrzeugkühlkreislauf	31
1.1.12	Thermomanagement	33
1.2	Entwicklungen im elektrifizierten Antriebsstrang	35
1.2.1	Traktions-Elektromotor	37
1.2.2	Hybridgetriebe	39
1.2.3	Hochspannungsbordnetz	41
1.2.4	Leistungselektronik	43
1.2.5	Leistungselektronik – Kühlung	45
1.2.6	Leistungselektronik – Ladesystem	47
1.2.7	Traktionsbatterie – Zellchemie	49
1.2.8	Traktionsbatterie – Zellebene	51
1.2.9	Traktionsbatterie – Batteriesystemebene	53
1.2.10	Traktionsbatterie – Batteriemanagementsystem (BMS)	55
1.2.11	Traktionsbatterie – Batterietemperierung	57
1.2.12	Brennstoffzelle	59
1.2.13	Elektrolyse	61
1.2.14	Wasserstoffversorgung – Distribution	63
1.2.15	Synthetische Kraftstoffe – Syntheseverfahren	65

2	Automatisiertes und vernetztes Fahren (CAD)	67
2.1	CAD – Umfelderkennung	69
2.1.1	Radar	71
2.1.2	LiDAR	75
2.1.3	Kamera	79
2.1.4	Ultraschall	83
2.2	CAD – Umsetzung	86
2.2.1	Aktuatoren	87
2.2.2	X-by-Wire	89
2.3	CAD – Navigation	91
2.3.1	Satellitenbasierte Positionierung	93
2.3.2	Weitere Entwicklungen bei der Positionierung	95
2.4	CAD – Kommunikation	97
2.4.1	Ferndistanzkommunikation	99
2.4.2	Nahdistanzkommunikation	101
2.4.3	Fahrzeuginterne Kommunikation	103
2.5	Exkurs: Mikrosystemtechnik als <i>Enabler</i> -Technologie	105

1 Entwicklungen im Antriebsstrang

Technologische Entwicklungen im Antriebsstrang sind ein wesentlicher Treiber des aktuellen Strukturwandels in der Automobilindustrie. Diese Entwicklungen haben angesichts immer strengerer Grenzwerte für den CO₂-Ausstoß in den vergangenen Jahren deutlich an Dynamik gewonnen. Während die Antriebsstrangentwicklung über Jahrzehnte von einer evolutionären Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors geprägt war, steht heute die Elektrifizierung des Antriebsstrangs im Fokus.

Eine besondere Herausforderung ergibt sich dabei aus der Vielzahl von Antriebsarten, die parallel entwickelt werden. Zu Benzin-, Diesel- und Gas-Motoren kommen batterieelektrische Antriebssysteme sowie der Brennstoffzellenantrieb. Auch unterschiedliche Formen der Hybridisierung des konventionellen Antriebsstrangs durch eine Kombination von Verbrennungs- und Elektroantrieb spielen auf dem Pkw-Markt nicht zuletzt aufgrund steuerlicher Vergünstigungen bereits heute eine wichtige Rolle.

Mit dem Ziel, den technologischen Wandel des Automobils im Bereich des Antriebsstrangs konkret und greifbar zu machen, wurde eine Reihe von Modulen identifiziert, die besonders von zukünftigen technologischen Entwicklungen im Antriebsstrang betroffen sind.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die aktuell absehbare technische Entwicklung dieser Module sowohl für den konventionellen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor (Unterkapitel 1.1) als auch für den elektrifizierten Antriebsstrang (Unterkapitel 1.2).

1.1 Entwicklungen des Verbrennungsmotors

Im Zentrum der gesellschaftlichen Debatte über die zukünftige automobile Mobilität stehen zumeist elektrifizierte Antriebsstränge. Nichtsdestotrotz bleibt auch die technologische Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors auf absehbare Zeit relevant. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der Etablierung von Elektrofahrzeugen im Markt, die sich international sowie auch regional mitunter deutlich unterscheiden.

Selbst in optimistischen Szenarien zur Durchdringung von Elektrofahrzeugen bleibt der Anteil verbrennungsmotorischer Fahrzeuge an den prognostizierten Zulassungszahlen in vielen Ländern mittel- bis langfristig signifikant hoch. Die wichtigste Anforderung an zukünftige Verbrennungsmotoren bleibt die CO₂-Reduktion. Des Weiteren sollen auch andere Emissionen reduziert sowie das Leistungsgewicht und die Sicherheit erhöht werden.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die aktuell absehbare technische Entwicklung der wichtigsten Komponenten verbrennungsmotorischer Antriebsstränge. Zu diesen Komponenten gehören neben dem Aggregat selbst die Luftversorgung, die Abgas-, die Einspritz- sowie die Zündanlage.

Auch für Motorsteuergeräte, Starter-Generatoren, das Getriebe, die Antriebswellen sowie Komponenten des Fahrzeugkühlkreislaufts sowie für solche zur Klimatisierung und zum Thermomanagement werden zukünftige technologische Entwicklungen beschrieben.

1.1.1 Verbrennungsmotor

Das grundlegende Arbeitsprinzip und der Grundaufbau des Verbrennungsmotors haben sich trotz weitreichender Entwicklungen seit dessen Erfindung nicht verändert. Verbrennungsmotoren können sowohl mit flüssigen, gasförmigen als auch mit festen Kraftstoffen betrieben werden. Als Kraftstoffe kommen somit nicht nur fossile Brennstoffe infrage, sondern auch beispielsweise synthetische Kraftstoffe oder Wasserstoff.

Im Laufe der Jahre sind die Motoren insbesondere leichter, leistungstärker, betriebssicherer sowie komplexer geworden. Aufgrund der Umweltbelastung, begrenzter Ressourcen und der damit einhergehenden stetig strikter werdenden Gesetzgebung sind in den letzten Jahren diesbezüglich wesentliche Entwicklungsfortschritte erzielt worden. Der Ausstoß von Schadstoffen konnte reduziert und dennoch die Leistung gesteigert werden. Besonders Hybridisierung und Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben stehen heutzutage im Mittelpunkt der Motorenentwicklung.

Die Roadmap zum Modul „Verbrennungsmotor“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „Wassereinspritzung“, „Variable Verdichtung und neue Brennverfahren“ sowie „Elektrischer Zusatzverdichter“. Diese Technologien sind weit entwickelt und zukünftig werden kurzfristig vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich Verbrennungsmotor-Triebwerk wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Insgesamt 190.441 Patente konnten identifiziert werden.

Hiernach sind Bosch, Schaeffler und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen unter den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, US-amerikanische OEM und Zulieferer komplettieren die Analyse. Insgesamt zeigt sich, dass zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung investieren und mit Patentanmeldungen aktiv sind.

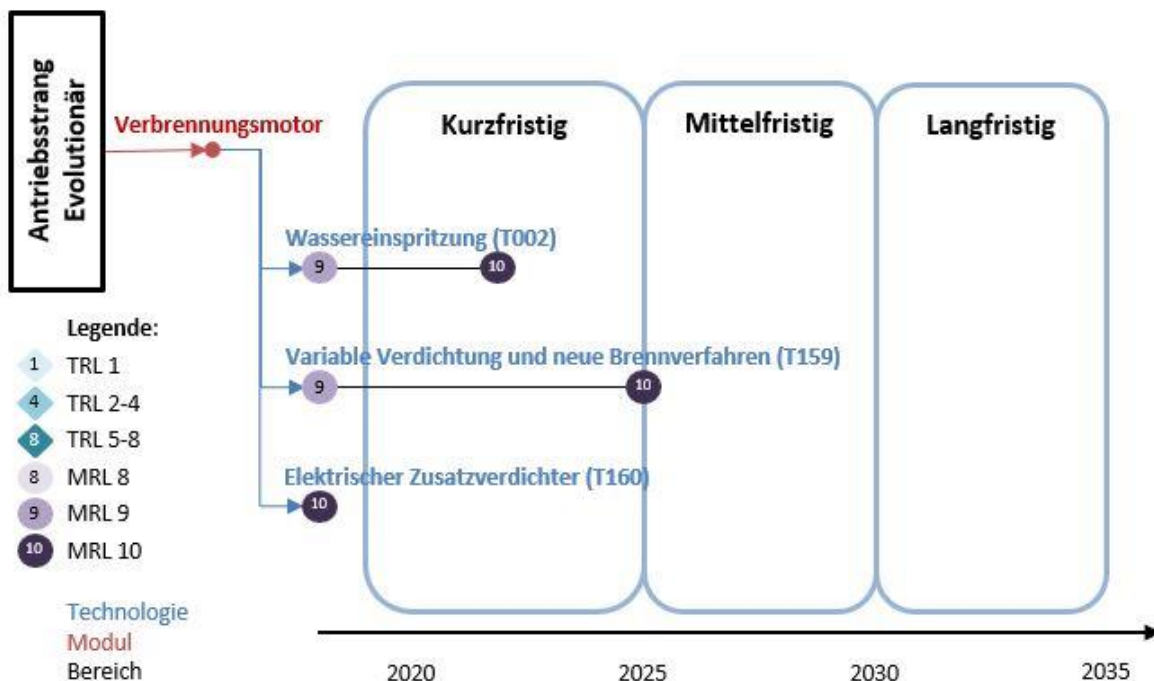


Abbildung 4: Roadmap „Verbrennungsmotor“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

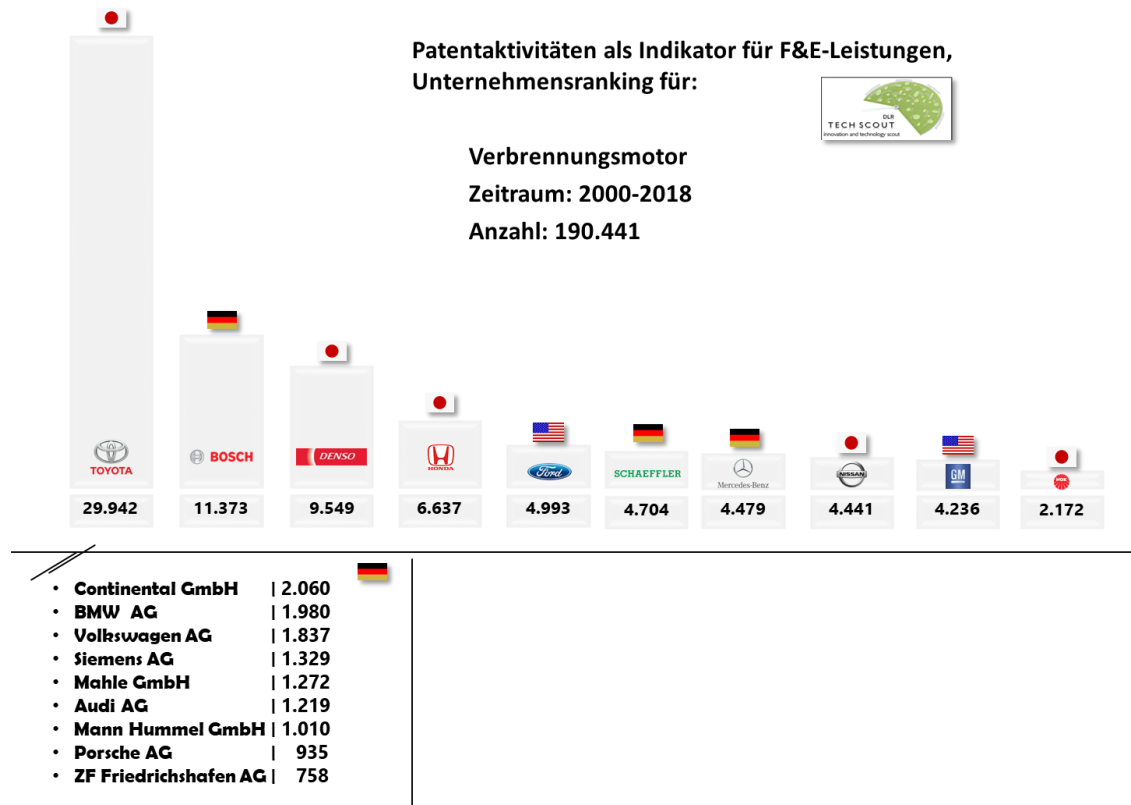


Abbildung 5: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Verbrennungsmotor“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Günter P. Merker, Rüdiger Teichmann: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. Springer Vieweg, 7. Auflage, 2014

Richard van Basshuysen, Fred Schäfer: Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Springer Vieweg, 8. Auflage, 2017

1.1.2 Verbrennungsmotor – Luftversorgung

Zur Verbrennung eines Stoffs wird ein Oxidationsmittel benötigt. Bei Verbrennungsmotoren wird in der Regel der Luftsauerstoff verwendet. Die chemische Energie des zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemischs wird in mechanische Energie umgewandelt. Die Effizienz und die Leistung des Motors sind vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis abhängig.

Die Luftversorgung ist eine Möglichkeit, den Verbrennungsprozess zu steuern und somit den Schadstoffausstoß und die Motorleistung zu beeinflussen. Die Luftversorgung ist damit eine der wichtigsten Stellgrößen für das Betriebsverhalten des Verbrennungsmotors und lässt sich gezielt durch eine Variation der Saugrohrlänge, der Ventilsteuerzeiten und des Ventilhubes steuern.

Die Roadmap zum Modul „Verbrennungsmotor – Luftversorgung“ umfasst den zentralen Technologietrend „Hochdruckverdichtung“. Es handelt sich um eine sehr reife Technologie, bei der in den nächsten Jahren keine deutlichen technologischen Sprünge mehr erwartet werden.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Verbrennungsmotor – Luftversorgung“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 10.543 Patente ausgewertet.

Hiernach sind Bosch und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen unter den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, US-amerikanische OEM und Zulieferer sowie ein französischer OEM komplettieren die Analyse. Zahlreiche deutsche Unternehmen – sowohl Zulieferer als auch OEM – investieren in die Technologieentwicklung.

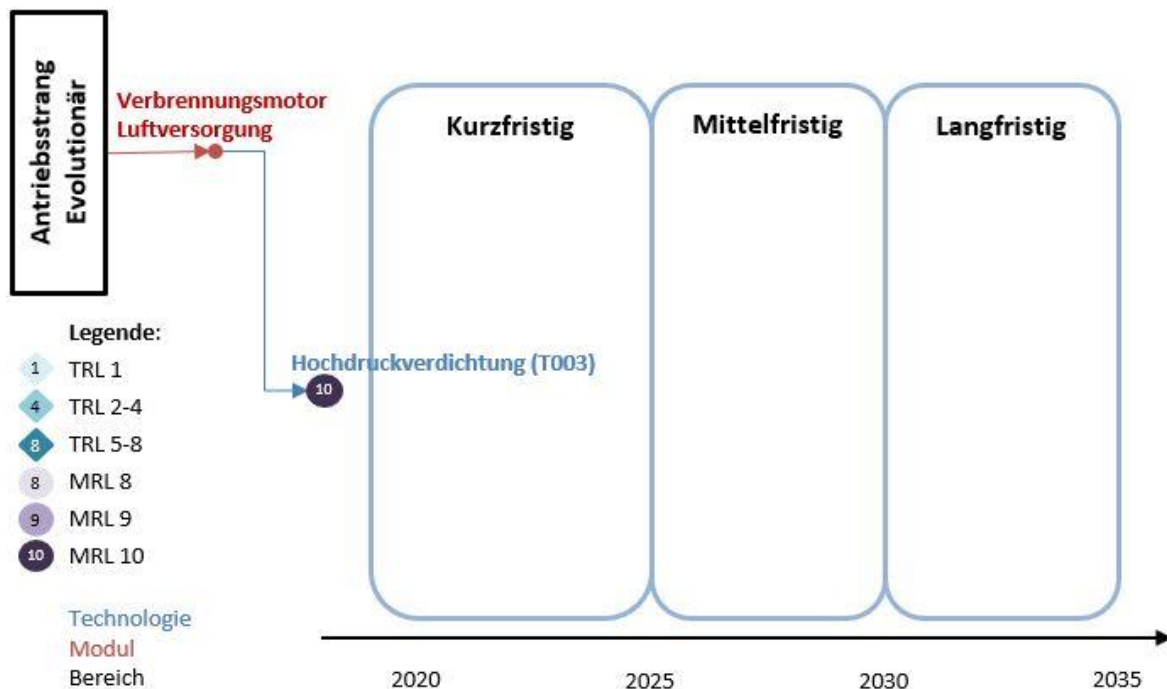


Abbildung 6: Roadmap „Verbrennungsmotor – Luftversorgung“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Verbrennungsmotor – Luftversorgung

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 10.543

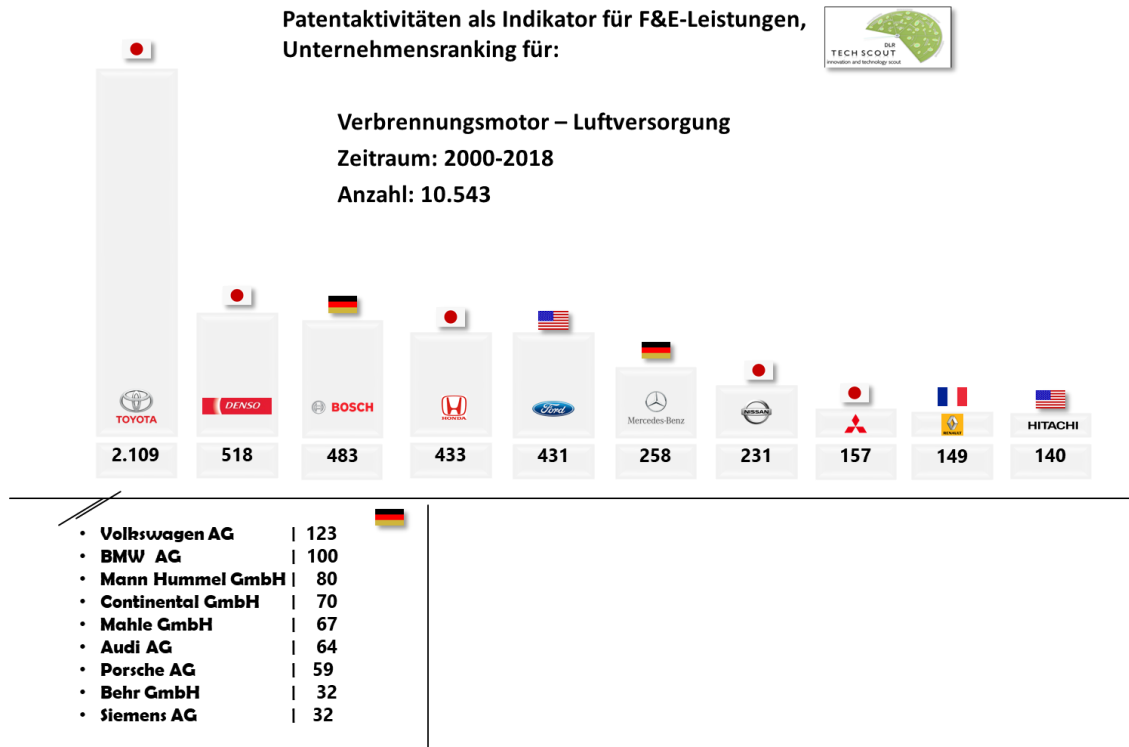


Abbildung 7: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Verbrennungsmotor – Luftversorgung“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Richard van Basshuysen, Fred Schäfer: Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Springer Vieweg, 8. Auflage, 2017

Klaus Schreiner: Verbrennungsmotoren in Handbuch – Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. Hrsg. Alfred Böge, Wolfgang Böge. Springer Vieweg, 2017, S. 1133–1197

1.1.3 Verbrennungsmotor – Abgasanlage

Das bei der Verbrennung im Motor entstandene Abgas wird über die Abgasanlage ins Freie abgeführt.

Mit der Abgasanlage wird zum einen die Motorleistung beeinflusst. Zum anderen hilft diese, die Abgasgeräusche zu mindern und Schadstoffe im Abgas zu reduzieren. Die Aufgaben der Abgasanlage beeinflussen sich stets wechselseitig, z. B. beeinträchtigt die Geräuschdämpfung auch meist die Motorleistung und umgekehrt.

Durch das Prinzip der Absorption und Reflexion des Schalls können Abgasgeräusche gemindert werden. Der Einbau von Katalysatoren unterstützt bei der Schadstoffreduktion und hat parallel auch schalldämpfende Eigenschaften.

Die Roadmap zum Modul „Verbrennungsmotor – Abgasanlage“ umfasst die vier zentralen Technologietrends „Lärmunterdrückung“, „Chemische Abgasbehandlung“, „Physikalische Filter“ und „Energierückgewinnung“. Diese vier Technologien sind weit entwickelt und es werden in den nächsten fünf Jahren nur noch geringfügige Weiterentwicklungen erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Verbrennungsmotor – Abgasanlage“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Insgesamt konnten 21.635 Patente identifiziert werden. Hiernach sind Bosch, Mercedes-Benz und Volkswagen als deutsche Unternehmen unter den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, aber auch US-amerikanische OEM und Zulieferer sind stark vertreten. Insgesamt zeigt sich, dass zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung investieren und mit Patentanmeldungen aktiv sind.

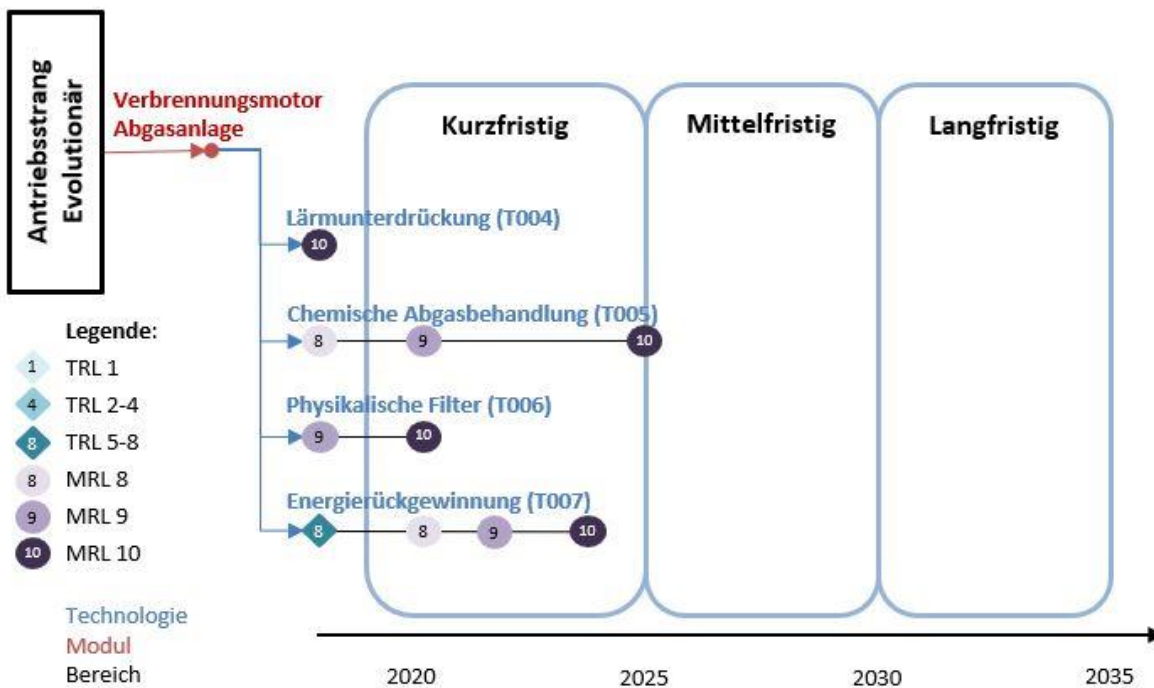


Abbildung 8: Roadmap „Verbrennungsmotor – Abgasanlage“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Verbrennungsmotor – Abgasanlage

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 21.635

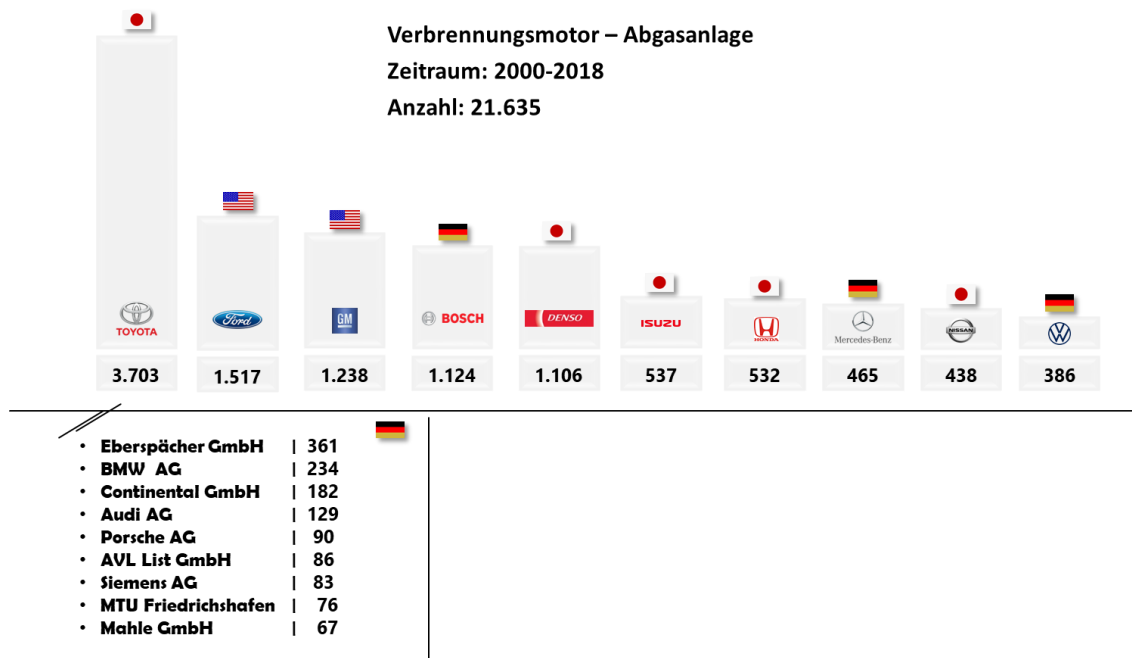


Abbildung 9: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Verbrennungsmotor – Abgasanlage“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quelle:

Richard van Basshuysen, Fred Schäfer: Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Springer Vieweg, 8. Auflage, 2017

1.1.4 Verbrennungsmotor – Einspritzanlage

Die Einspritzanlage bereitet das Kraftstoffgemisch für die Verbrennung auf, d. h., der Kraftstoff wird unter hohem Druck angesaugter Luft beigemischt. Eingesetzt wird die Einspritzanlage heutzutage sowohl in Otto- als auch Diesel-Motoren. Die grundlegenden Aufgaben der Einspritzanlage von Otto- und Diesel-Motoren unterscheiden sich nicht. Sie variieren lediglich aufgrund der unterschiedlichen Art von Gemischaufbereitung in ihrem Aufbau.

Die Einspritzanlage besteht grundsätzlich aus einer Komponente, die für die Erzeugung hohen Drucks zuständig ist. Des Weiteren besteht diese aus einem Filtersystem zum Abfangen von Schmutzpartikeln, Einspritzventilen sowie Leitungen. Zur Regelung der korrekten Kraftstoffmenge je nach Betriebszustand wird sowohl beim Otto- als auch beim Diesel-Motor ein Motorsteuergerät eingesetzt.

Beim Otto-Motor wird eine stöchiometrische Gemischbildung angestrebt. Die Einspritzung kann u. a. mittels eines Saugrohrs erfolgen. Bei diesem Verfahren wird der Kraftstoff in das Saugrohr jedes Zylinders vor dem Einlassventil gespritzt. Allerdings erfolgt mit diesem Verfahren nicht immer eine gleichmäßige Verteilung des Kraftstoffs auf die Zylinder. Eine gleichmäßige Verteilung ist aber erstrebenswert, da auf diese Weise Schadstoffemissionen reduziert werden können.

Ein modernes Verfahren der Einspritzung bei Otto-Motoren ist die Direkteinspritzung, wobei der Kraftstoff direkt in den Zylinder gespritzt wird und somit erst dort verdampft. Auf diese Weise wird der Zylinder gekühlt und im Zuge dessen die Klopfgefahr gemindert. Allerdings muss bei diesem Verfahren der Einspritzvorgang sehr früh stattfinden, damit ein homogenes Gemisch entstehen kann. Ein homogenes Gemisch ist wichtig, da andernfalls schlechter Motorlauf sowie Rußbildung drohen.

Beim Diesel-Motor spielt die Kraftstoffmenge eine bedeutende Rolle. Der Kraftstoff wird unmittelbar vor der Verbrennung in den Brennraum gepumpt und dort mit der Luft vermischt. Hierbei ist es wichtig, die exakte Menge an Kraftstoff abhängig vom Betriebszustand zuzuführen und den richtigen Einspritzzeitpunkt zu wählen.

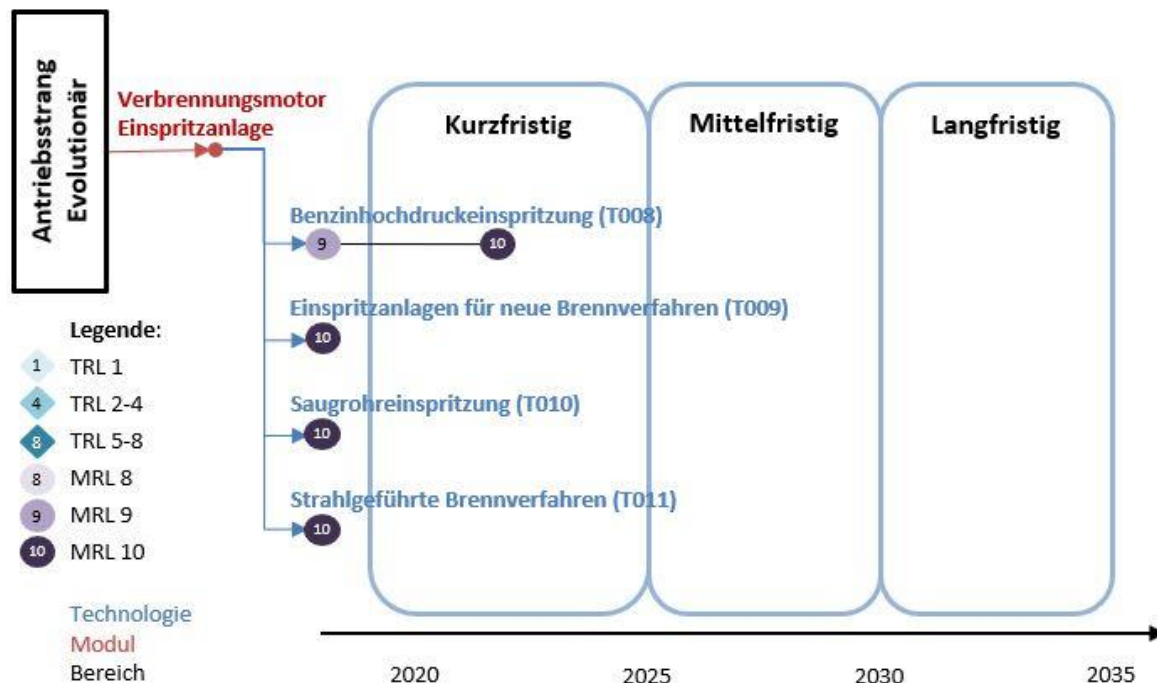


Abbildung 10: Roadmap „Verbrennungsmotor – Einspritzanlage“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Die Roadmap zum Modul „Verbrennungsmotor – Einspritzanlage“ umfasst die vier zentralen Technologietrends „Benzinhochdruckeinspritzung“, „Einspritzanlagen für neue Brennverfahren“, „Saugrohreinspritzung“ und „Strahlgeführte Brennverfahren“. Es handelt sich bei den vier Technologien um sehr reife Technologien, bei denen zukünftig kaum mit technologischen Entwicklungen gerechnet wird.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Verbrennungsmotor – Einspritzanlage“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. 11.887 Patente konnten bewertet werden. Hiernach sind Bosch, Continental und Siemens als deutsche Unternehmen unter den Top Ten weltweit vertreten, Bosch führt das Ranking auf Platz 1 an. Japanische und US-amerikanische OEM und Zulieferer sind auf den weiteren Plätzen vertreten. Insgesamt zeigt sich, dass zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung investieren und mit Patentanmeldungen aktiv sind.

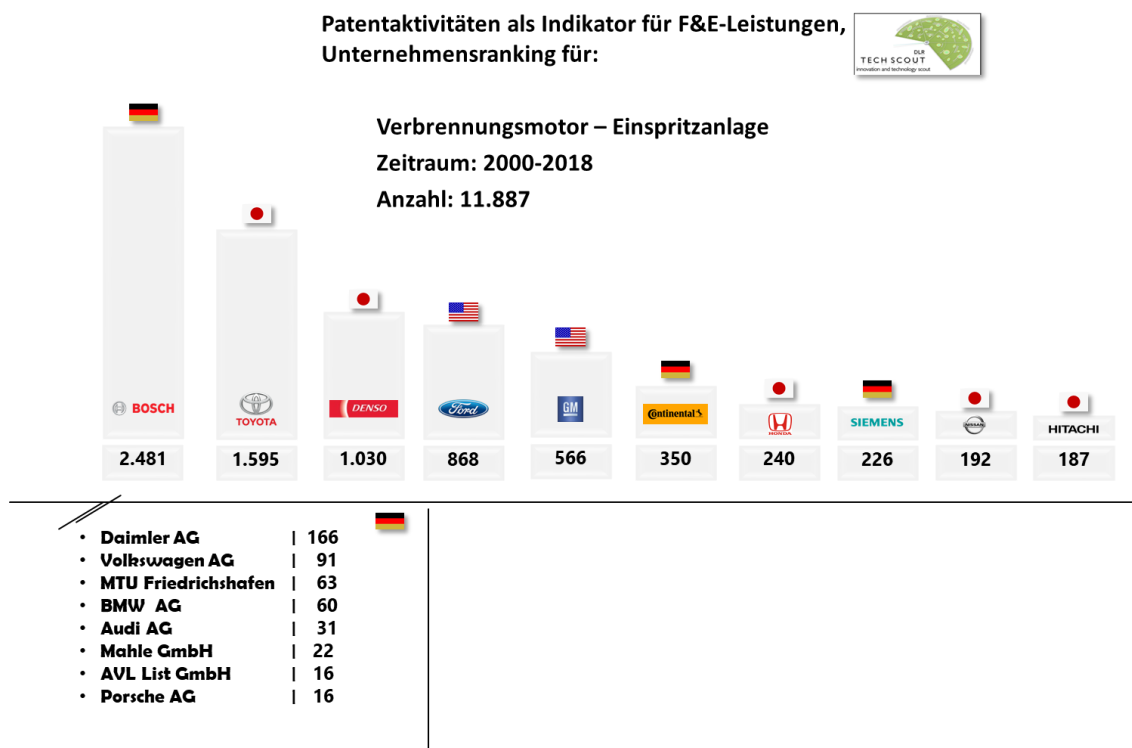


Abbildung 11: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Verbrennungsmotor – Einspritzanlage“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quelle:

Klaus Schreiner: *Verbrennungsmotoren in Handbuch – Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik.* Hrsg. Alfred Böge, Wolfgang Böge. Springer Vieweg, 2017, S. 1133–1197

1.1.5 Verbrennungsmotor – Zündanlage

Otto-Motoren sind fremdzündend und bedürfen – im Gegensatz zum selbstzündenden Diesel – einer Zündanlage. Die optimale Einstellung des Zündzeitpunkts ist wichtig, weil es sonst zum Klopfen kommen kann. Deshalb werden Zündanlagen weiterhin optimiert.

Die Roadmap zum Modul „Verbrennungsmotor – Zündanlage“ umfasst die vier zentralen Technologietrends „Doppelspulen-System“, „Corona-Zündung“, „Mikrowellenzündtechnologie“ und „Laserzündung“. Diese vier Technologien sind weit entwickelt. Lediglich bei den beiden Technologietrends „Mikrowellenzündtechnologien“ und „Laserzündung“ werden zukünftig weitere Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Verbrennungsmotor – Zündanlage“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Im genannten Zeitraum konnten 5.768 Patente identifiziert werden.

Hiernach ist nur Bosch als deutsches Unternehmen unter den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, gefolgt von US-amerikanischen OEM und Zulieferern. Ein französischer OEM komplettiert die Darstellung. Insgesamt zeigt sich, dass zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung investieren und mit Patentanmeldungen aktiv sind.

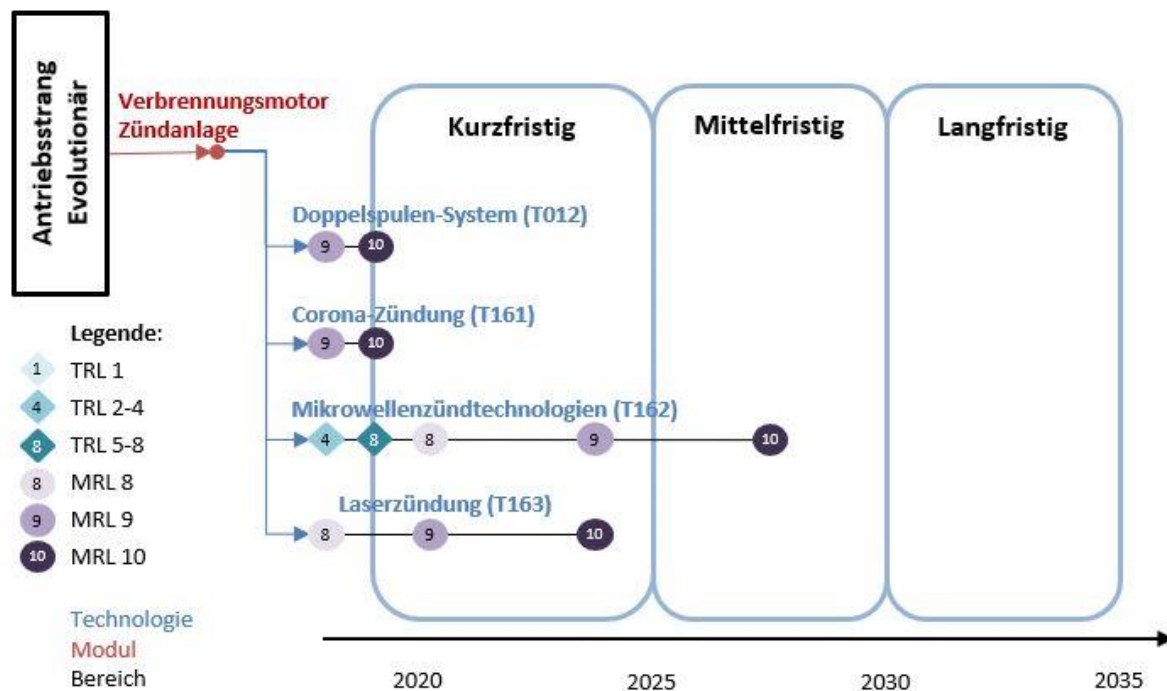


Abbildung 12: Roadmap „Verbrennungsmotor – Zündanlage“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

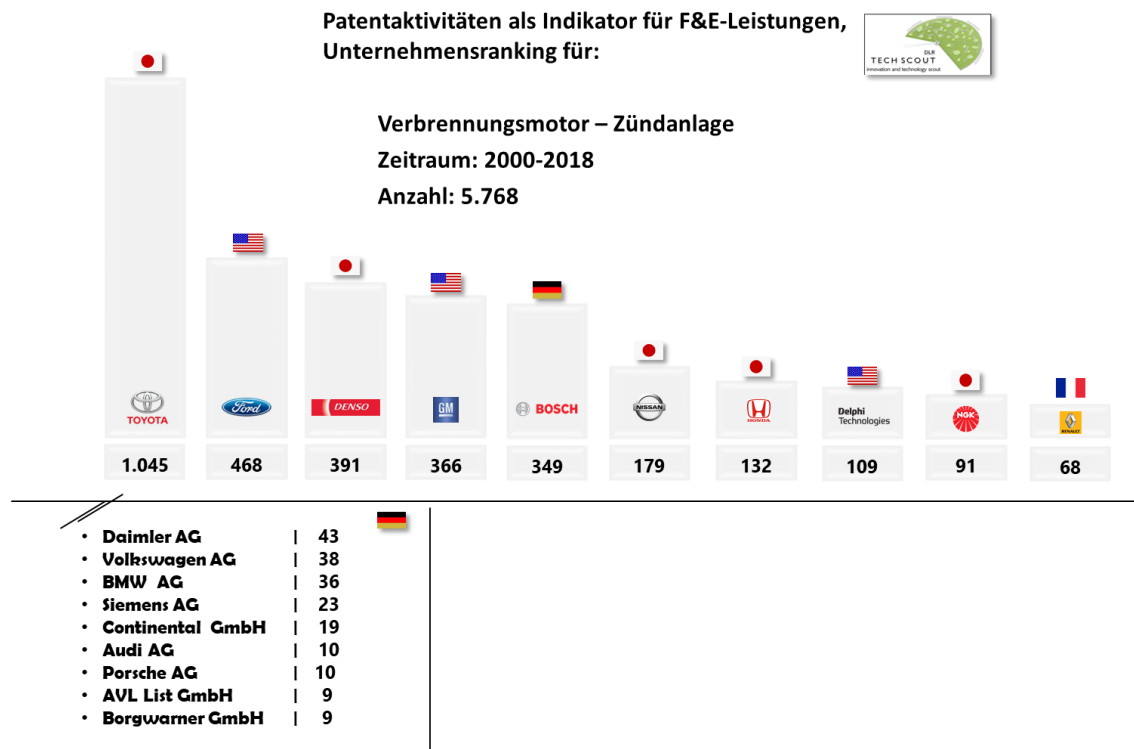


Abbildung 13: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Verbrennungsmotor – Zündanlage“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quelle:

Richard van Basshuysen, Fred Schäfer: Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Springer Vieweg, 8. Auflage, 2017

1.1.6 Motorsteuergeräte

Motorsteuergeräte haben einen sehr weitreichenden Funktionsumfang. Sie sind u. a. zuständig für die Regelung der Kraftstoffversorgung, der Luftsteuerung, der Kraftstoffeinspritzung und der Zündung. Sie haben zur Aufgabe, alle relevanten Informationen der Sensoren zu erfassen, zu verarbeiten und anschließend entsprechende Signale an die Aktuatoren zu geben.

Mithilfe von Motorsteuergeräten soll ein optimales Fahrverhalten gewährleistet werden.

Die Roadmap zum Modul „Motorsteuergeräte“ umfasst die zwei zentralen Technologietrends „Deep Learning/KI für das Steuergerät“ und „Energieeffizienz“. Diese zwei Technologien sind technologisch unterschiedlich weit entwickelt. Für den Technologietrend „Energieeffizienz“ wird zukünftig nicht mit deutlichen technologischen Entwicklungen gerechnet. Dahingegen werden für den Technologietrend „Deep Learning/KI für das Steuergerät“ in den nächsten zehn Jahren deutliche technologische Sprünge erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Verbrennungsmotor – Motorsteuergeräte“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 32.258 Patente ausgewertet. Hiernach ist nur Bosch als deutsches Unternehmen unter den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt, ein französischer und ein US-amerikanischer OEM komplettieren die Darstellung. Auch hier investieren zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen aktiv.

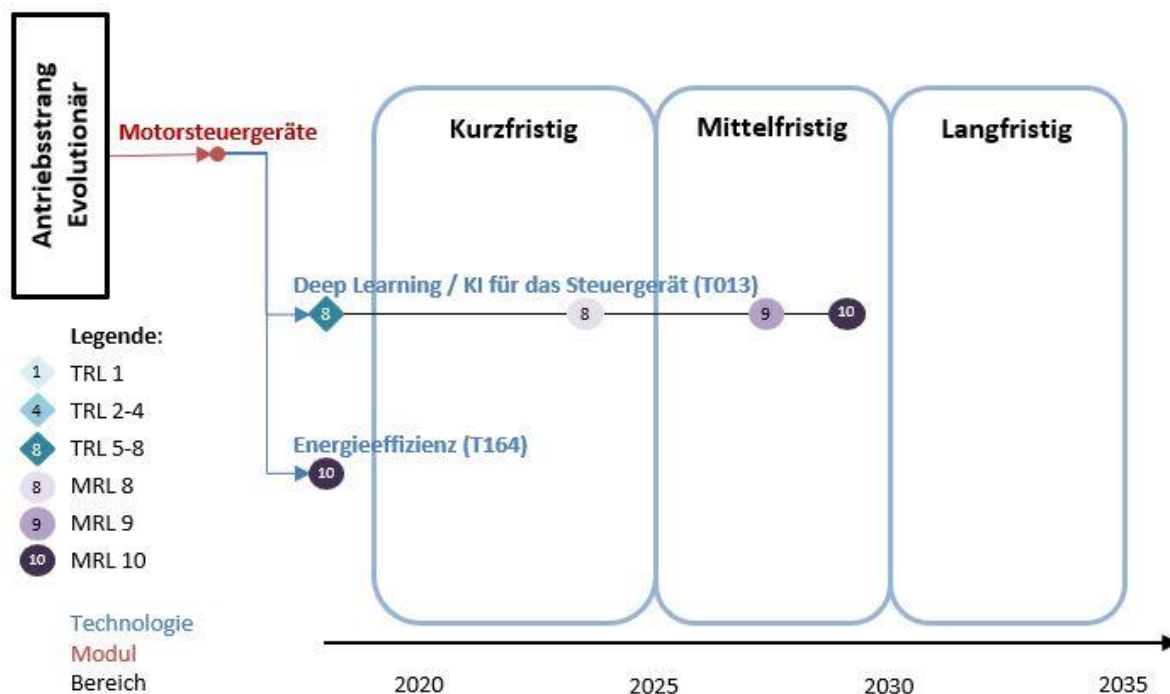


Abbildung 14: Roadmap „Verbrennungsmotor – Motorsteuergeräte“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

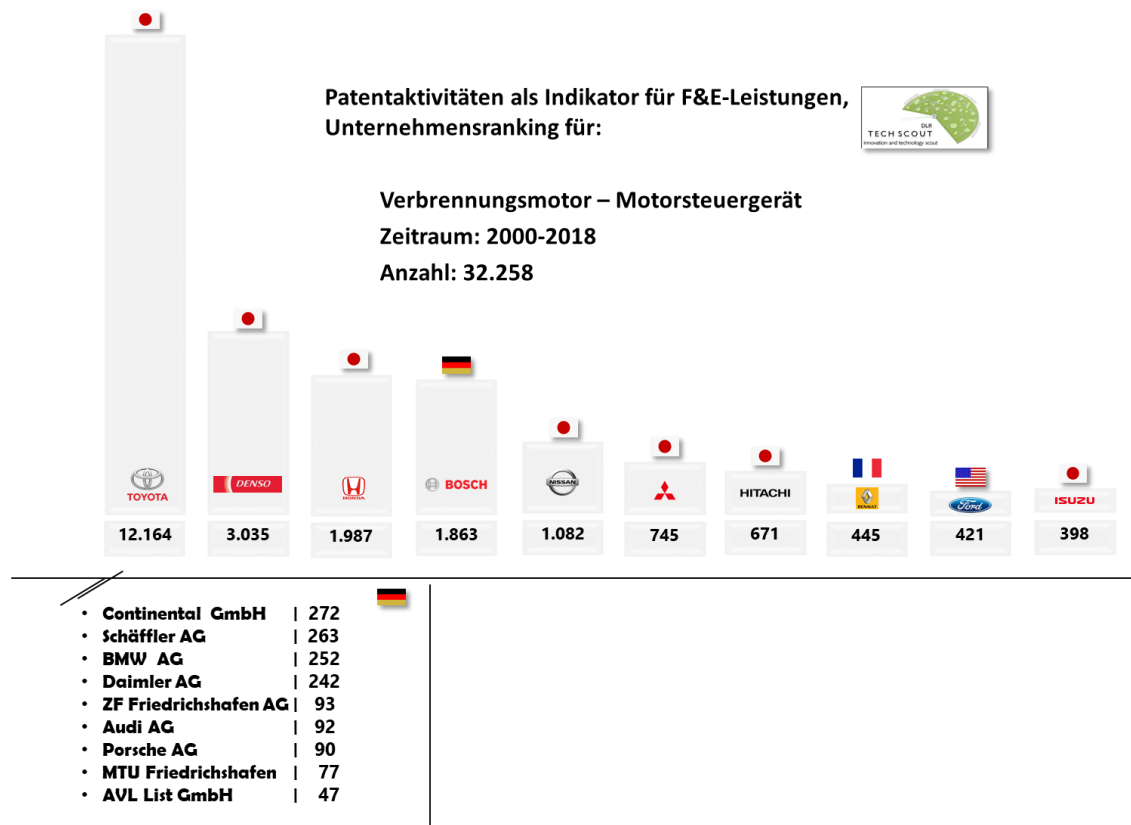


Abbildung 15: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Verbrennungsmotor – Motorsteuergerät“
2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

K. Reif (Hrsg.): Basiswissen Ottomotor-Management. Einspritzung, Zündung, elektronische Steuerung und Regelung. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018

K. Reif (Hrsg.): Basiswissen Dieselmotor-Management. Einspritzung, elektronische Steuerung und Regelung. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018

1.1.7 Starter-Generator

Der Starter-Generator integriert, wie der Name schon sagt, Starter und Generator in einem und hat die Aufgabe, den Motor zu starten, bei der Beschleunigung zu unterstützen und elektrischen Strom zu erzeugen. Dieser Generatorbetrieb spielt hierbei eine besonders wichtige Rolle, da der Energiebedarf im Auto stetig ansteigt.

Aufgrund des Starter-Generators ist die Integration eines Start-/Stopp-Systems ins Fahrzeug möglich.

Die Roadmap zum Modul „Starter-Generator“ umfasst die zwei zentralen Technologietrends „Riemen-Starter-Generator“ und „Kurbelwellen-Starter-Generator“. In den kommenden fünf Jahren werden bei diesen zwei Technologietrends nur noch geringfügige Entwicklungen hin zum MRL 10 erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Starter-Generator“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 805 Patente untersucht.

Hiernach sind Bosch, Schaeffler, Mercedes-Benz, BMW und Volkswagen als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Sie dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt, wobei ein US-amerikanischer OEM auf Platz 1 steht. Auch ein südkoreanischer Automobilhersteller ist im Ranking vertreten. Im Vergleich zu den vorherigen Modulen investieren weniger deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen aktiv.

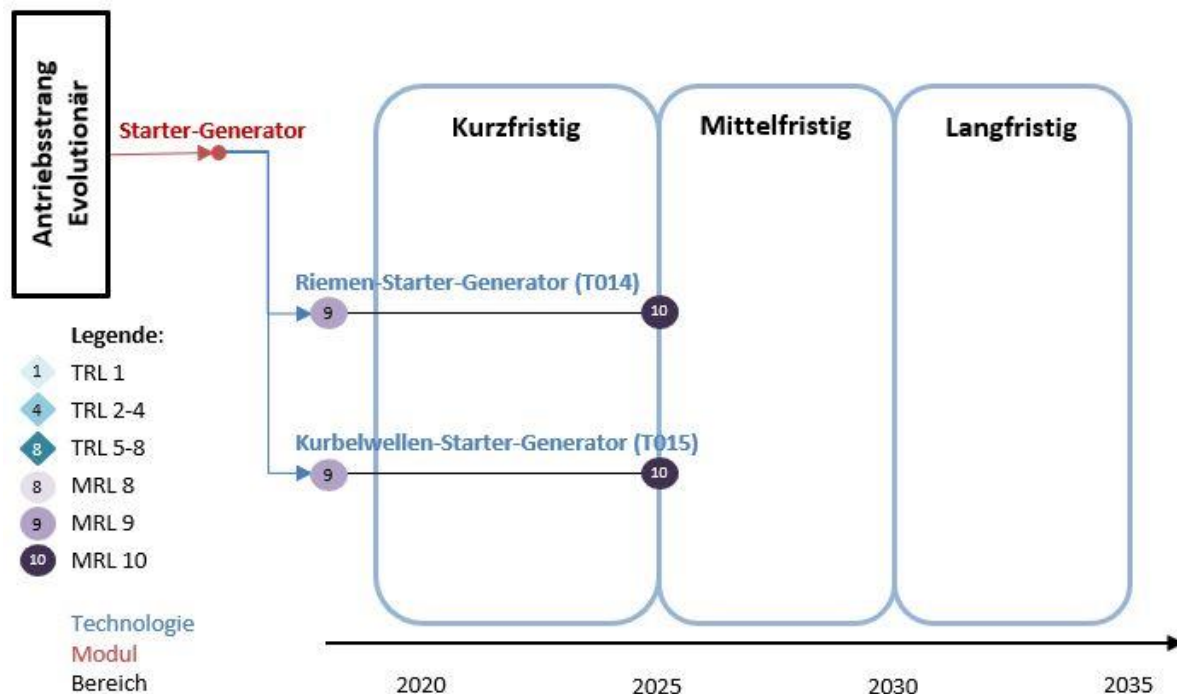


Abbildung 16: Roadmap „Verbrennungsmotor – Starter-Generator“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Verbrennungsmotor – Starter-Generator

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 805

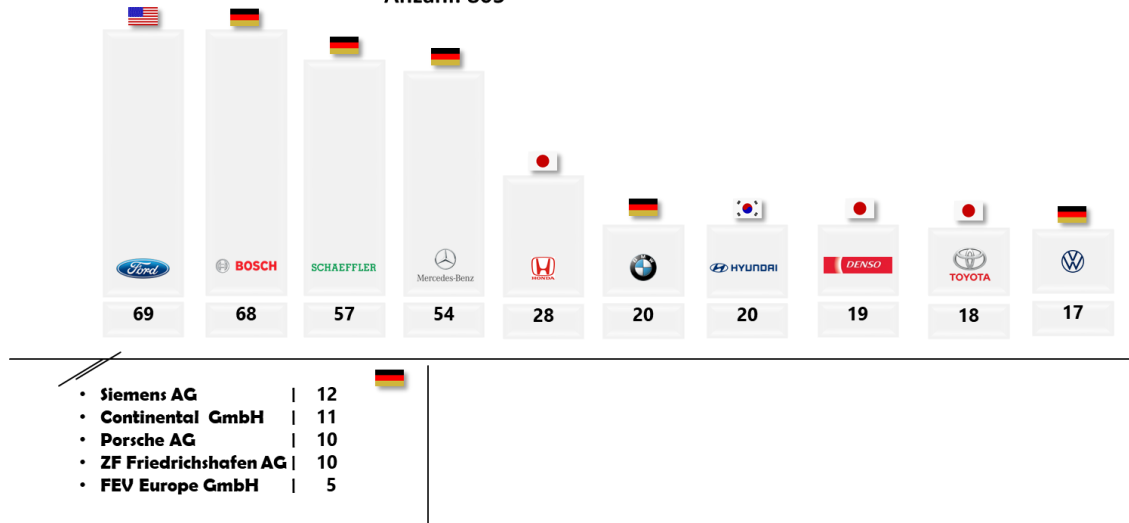


Abbildung 17: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Verbrennungsmotor – Starter-Generator“
2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

G. Friedrich, A. Girardin: Integrated Starter Generator. *IEEE Industry Applications Magazine*, Jg. 15, Nr. 4, 2009, S. 26–34
K. Chunhua Liu et al.: A Permanent-Magnet Hybrid Brushless Integrated Starter-Generator for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Jg. 57, Nr. 12, 2010, S. 4055–4064

1.1.8 Getriebe

Das Getriebe ist Teil des Antriebsstrangs. Es wandelt und überträgt das Drehmoment des Motors auf die Räder. Des Weiteren wird durch das Getriebe erst ein effizientes Fahren ermöglicht. Zudem wird mit dem Getriebe die Fahrtrichtung festgelegt, d. h. das Vorwärts- bzw. Rückwärtsfahren des Fahrzeugs. Das Getriebe beeinflusst außerdem eine Vielzahl weiterer Fahrzeugeigenschaften, wie die Rangiergeschwindigkeit, die Beschleunigung des Fahrzeugs, die Motorbremswirkung sowie den Kraftstoffverbrauch.

Bei E-Motoren kann auf das Getriebe verzichtet werden, da aufgrund eines weiteren Drehzahlpektrums ein hohes Drehmoment erzeugt werden kann. Zum Rückwärtsfahren ist es lediglich notwendig, die Drehrichtung des E-Motors zu ändern. E-Motoren ohne Getriebe haben den Vorteil, dass keine zusätzlichen Verluste durch das Getriebe auftreten und somit ein besserer Wirkungsgrad erreicht werden kann. Des Weiteren entfallen der Wartungsaufwand und der Anschaffungspreis für das Getriebe. Stattet man allerdings einen E-Motor mit Getriebe aus, können die Motoren kleiner und leichter dimensioniert sowie die Anschaffungskosten des Motors selbst reduziert werden. Außerdem lässt sich beim Anfahren eine höhere Geschwindigkeit realisieren. Je nach Anwendungsfall bedarf es einer präzisen Analyse, ob ein Getriebe im E-Motor sinnvoll ist.

Die Roadmap zum Modul „Getriebe“ umfasst die vier zentralen Technologietrends „Intelligente Getriebe“, „Exponentialgetriebe/Hochdrehzahlgetriebe“, „Reduktion der mechanischen Komplexität“ und „Funktionsintegration“. Beim Technologietrend „Exponentialgetriebe/Hochdrehzahlgetriebe“ werden in den nächsten zehn Jahren insbesondere noch weitere Impulse bei den Herstellungsverfahren erwartet. Bei den anderen drei Technologietrends wird dagegen zukünftig nicht mehr mit deutlichen technologischen Entwicklungen gerechnet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Getriebe“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Im gesamten Betrachtungszeitraum wurden 203.124 Patente identifiziert.

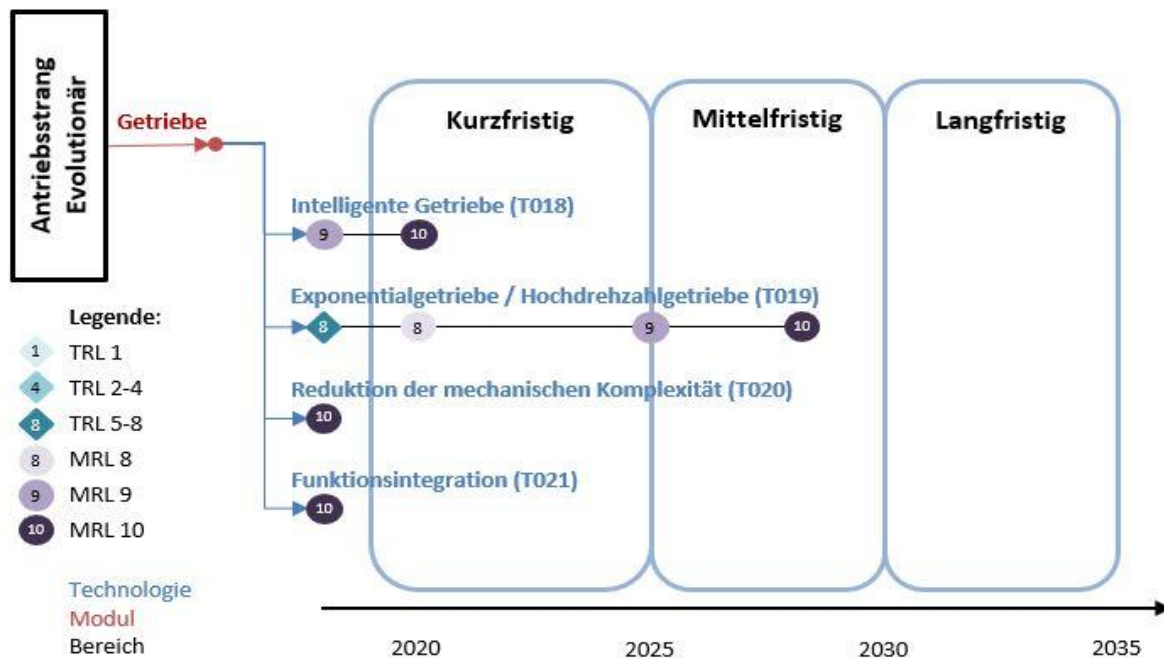


Abbildung 18: Roadmap „Getriebe“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Hiernach sind ZF, Schaeffler, Bosch und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen führen die Rangliste nach Patentzahl insgesamt an, ein US-amerikanischer Zulieferer komplettiert das Ranking. Weitere deutsche Unternehmen außerhalb der Top Ten sind BMW, Siemens, Audi und Porsche.

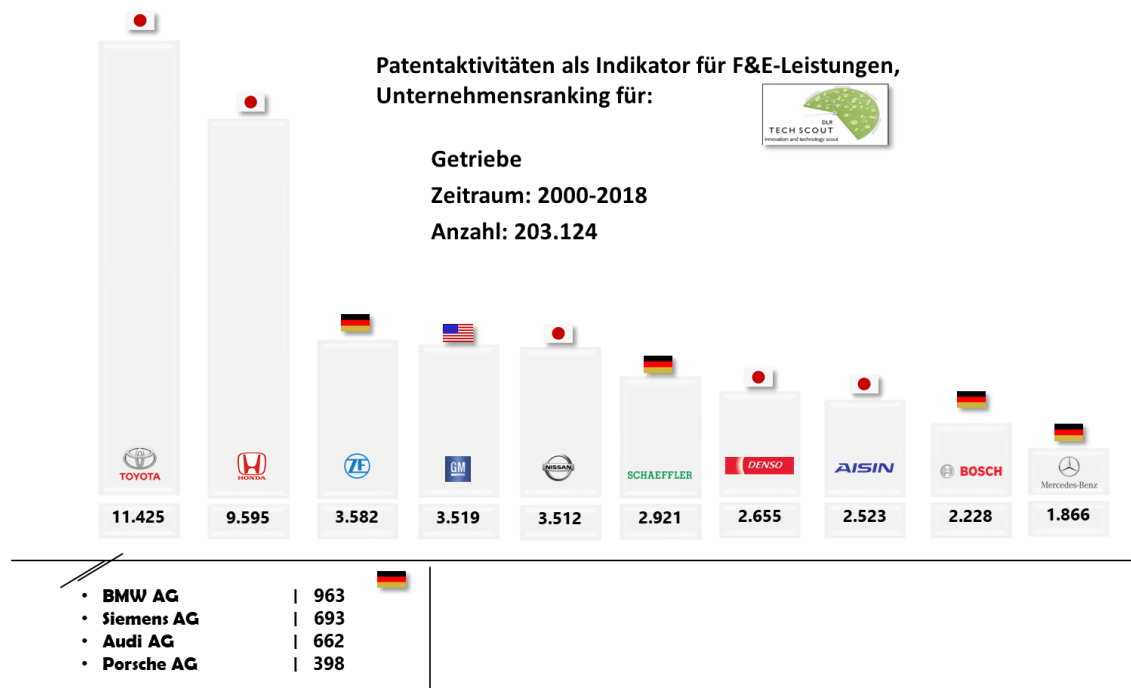


Abbildung 19: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Getriebe“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Michael Hilgers: *Getriebe und Antriebsstrangauslegung*. Springer Vieweg, 2016

Aradex (Hrsg.): *Getriebe vs. Direktantrieb: eine Gegenüberstellung*, <https://www.aradex.de/de/system-solutions/whitepaper-leistungselektronik/getriebe-vs-direktantrieb> (abgerufen am: 21.03.2020)

Waldemar Steinhilper, Bernd Sauer: *Konstruktionselemente des Maschinenbaues 2. Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*, Springer, 5. Auflage, 2006

1.1.9 Wellen

Antriebswellen dienen zur Übertragung der mechanischen Leistung und der Drehrichtung. Die Aufgabe von Antriebswellen besteht in der Weiterleitung des Drehmoments sowie der Drehbewegung des Motors. Zur gleichmäßigen Übertragung der Drehbewegung haben Antriebswellen zum Achsgetriebe hin ein Tripodegelenk. Radseitig verfügen sie über ein Kugelgelenk.

Man unterscheidet zwischen starren und beweglichen Antriebswellen. Bewegliche Antriebswellen werden auch als Gelenkwellen bezeichnet. Sie sollen konstruktionsbedingte Unterschiede ausgleichen.

In der Regel sind Antriebswellen in Pkw wartungsfrei.

Die Roadmap zum Modul „Wellen“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „Leichtbau durch hochfeste Stähle“, „Neue Werkstoffe (Kunststoffe)“ und „Nutzung als Sensor“. Diese drei Technologien sind unterschiedlich weit entwickelt. Während beim Technologietrend „Leichtbau durch hochfeste Stähle“ keine weiteren deutlichen technologischen Entwicklungen angenommen werden, werden bei den übrigen beiden Technologietrends in den nächsten Jahren weitere Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet.

Eine Analyse von Patentanmeldungen konnte für dieses Modul nicht durchgeführt werden, da für die betrachteten Technologien keine trennscharfe Eingrenzung geeigneter Suchbegriffe möglich war.

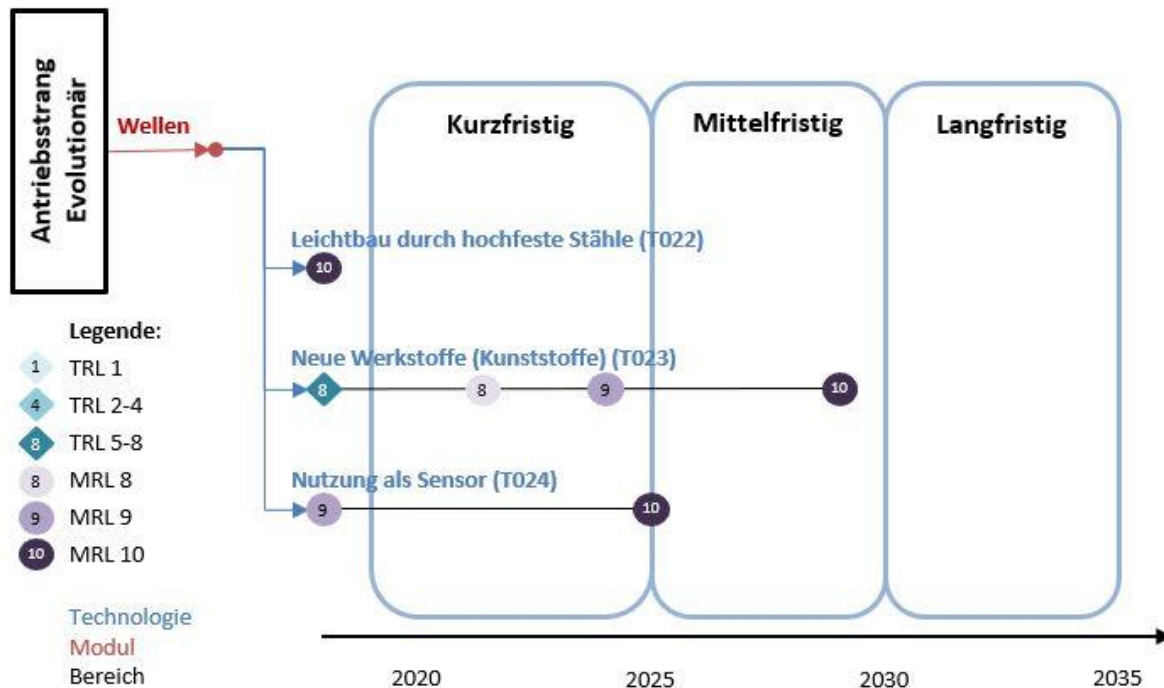


Abbildung 20: Roadmap „Wellen“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Quelle:
M. Trzesniowski: Antrieb. Springer Vieweg, 2017, S. 374–375

1.1.10 Klimatisierung

Die Aufgabe der Klimatisierung besteht darin, im Fahrzeuginnenraum ein angenehmes und im Idealfall konstantes Klima zu erzeugen. Auf diese Weise soll für die Fahrzeuginsassen und insbesondere für die Fahrenden ein komfortables und belastungsarmes Kabinenklima erreicht werden. Dies hat Einfluss auf das Wohlbefinden der Insassen und auf die Konzentrationsfähigkeit der Fahrenden. Außerdem kann ein Beschlag der Scheiben durch eine richtige Klimatisierung verhindert werden, sodass eine gute Sicht gewährleistet wird. Damit trägt das Kabinenklima auch zur Sicherheit von Fahrenden und Fahrzeuginsassen bei.

Durch die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums können Lufttemperatur, -feuchte, -qualität und -ströme beeinflusst werden.

Aufgrund der Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums steigt der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bzw. der Energieverbrauch von E-Autos, was deren Fahrleistung verringert. Aus diesem Grund gilt es, die Klimatisierung möglichst effizient zu gestalten.

Die Roadmap zum Modul „Klimatisierung“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „Energiebedarfsreduzierung“, „Lokale Klimatisierung“ und „Thermische Isolierung der Fahrgastkabine“. Diese drei Technologien sind eher weit entwickelt und werden binnen der nächsten fünf Jahre MRL 10 erreichen.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Klimatisierung“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und insgesamt 62.042 Patente ausgewertet. Hiernach sind Mahle und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt, ein südkoreanischer und ein französischer Zulieferer sowie ein US-amerikanischer OEM komplettieren die Darstellung. Insgesamt investieren zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

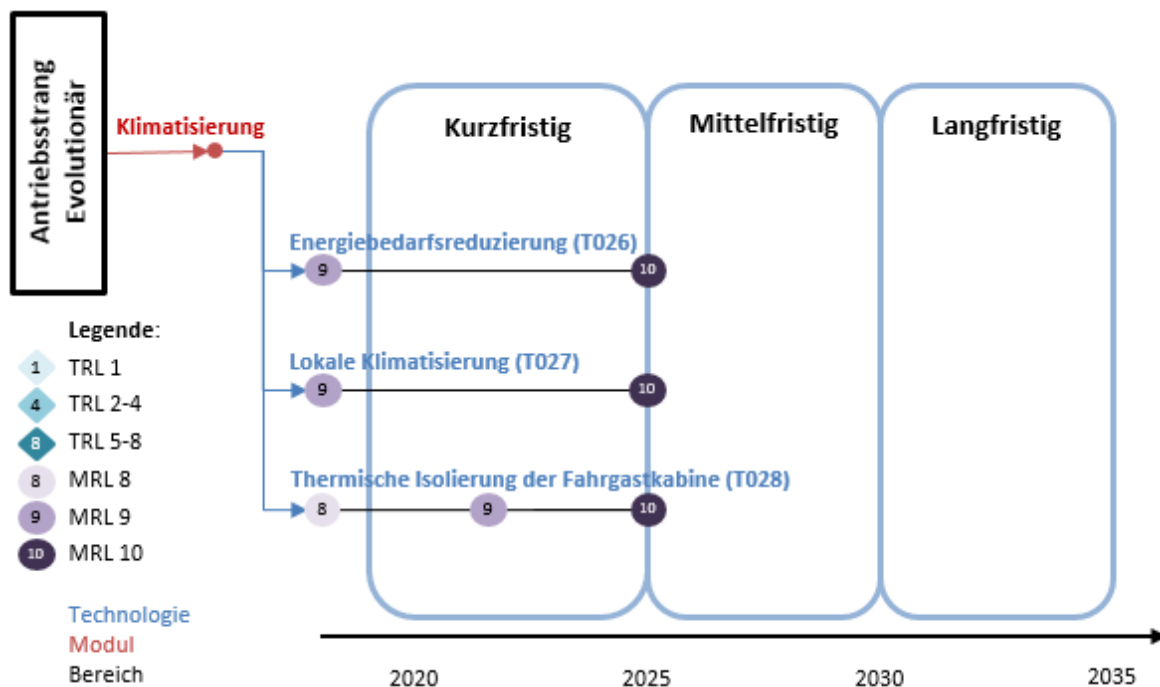


Abbildung 21: Roadmap „Klimatisierung“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

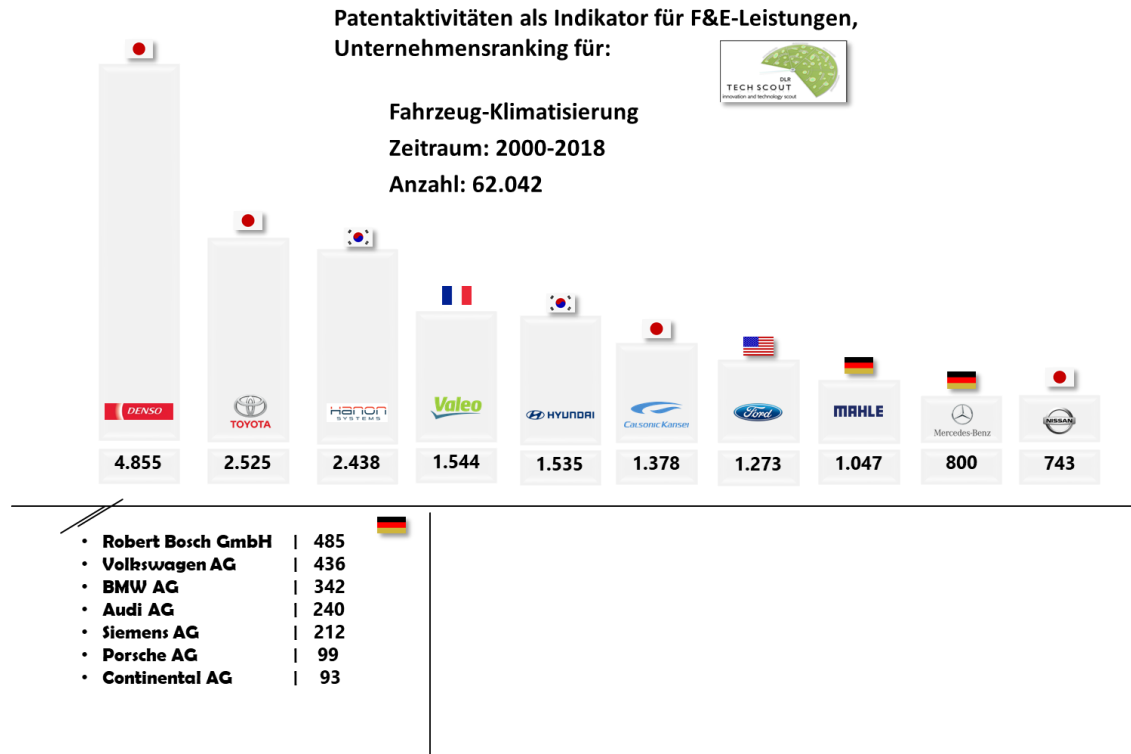


Abbildung 22: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Klimatisierung“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Michael Fritz: Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung von Nutzfahrzeugen. KIT Scientific Publishing. Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik. Band 37

Y. Lethwala, P. Garg: Development of auxiliary automobile air conditioning system by solar energy. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Jg. 4, Nr. 7, 2017

1.1.11 Fahrzeugkühlkreislauf

Im Motor eines Fahrzeugs wird Wärme freigesetzt. Die erzeugte Wärme muss abgeführt werden, da die Betriebstemperatur des Motors erheblichen Einfluss auf dessen Leistung und Effizienz hat.

Im Laufe der Weiterentwicklung von Kraftfahrzeugen hat man die Kühlkreisläufe des Verbrennungsmotors mit weiteren Kühlkreisläufen des Fahrzeugs verknüpft. So wird beispielsweise die vom Verbrennungsmotor erzeugte Wärme zur Temperierung weiterer Komponenten, wie z. B. der Batterie oder des Fahrzeuginnenraums, verwendet.

Heiz- und Kühlsysteme haben sich im Laufe der Jahre erheblich weiterentwickelt. Zuerst fokussierte man sich auf die Kühlung der Komponenten des Antriebsstrangs, wie Verbrennungsmotor und Getriebe. Später wurde dann die Ladeluftkühlung eingeführt, mithilfe derer die Schadstoffemissionen reduziert und gleichzeitig die Leistung gesteigert werden konnte. Durch den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in elektrifizierten Fahrzeugen kommt der Temperierung des Batteriesystems eine besondere Bedeutung zu. Dies verdeutlicht, dass es in diesem Feld noch beträchtliches Weiterentwicklungspotenzial gibt.

Die Roadmap zum Modul „Fahrzeugkühlkreislauf“ umfasst die zwei zentralen Technologietrends „Thermomanagement Batterie, Motor, Leistungselektronik“ und „Temperaturmanagement Batterie“. Diese zwei Technologien sind sehr weit entwickelt. Beim Technologietrend „Thermomanagement Batterie, Motor, Leistungselektronik“ wird zukünftig mit keinen weiteren technologischen Entwicklungen gerechnet. Beim Technologietrend „Temperaturmanagement Batterie“ wird innerhalb der nächsten fünf Jahre das Erreichen des MRL 10 erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Fahrzeugkühlkreislauf“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 9.920 Patente ausgewertet. Hiernach sind Mercedes-Benz, Bosch, Mahle und BMW als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Zwei japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, auch französische OEM und Zulieferer sind stark vertreten. Insgesamt investieren zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

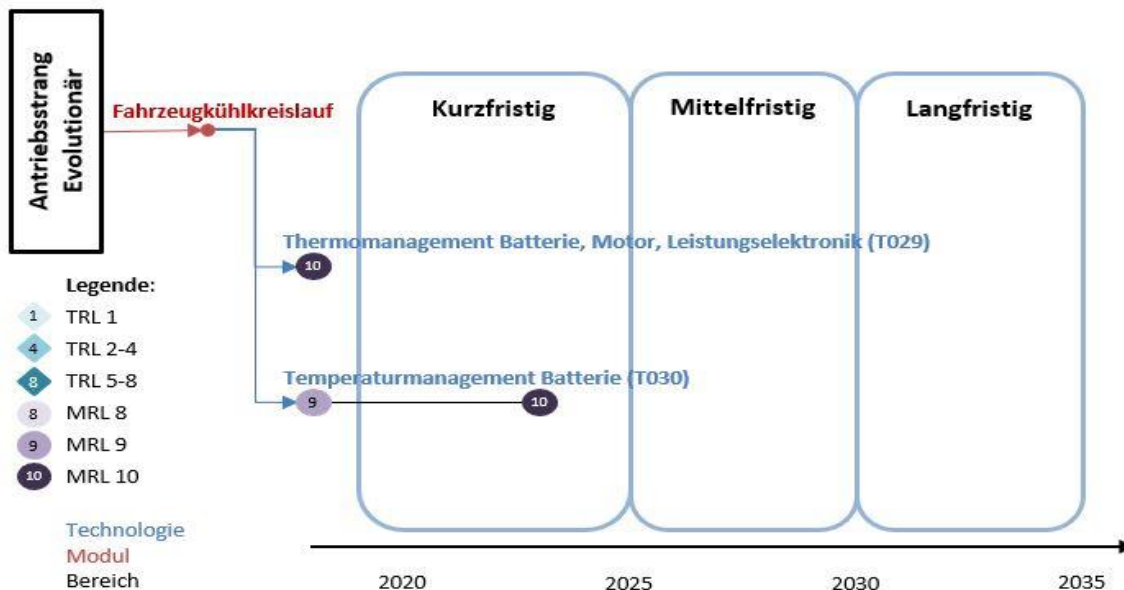


Abbildung 23: Roadmap „Fahrzeugkühlkreislauf“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

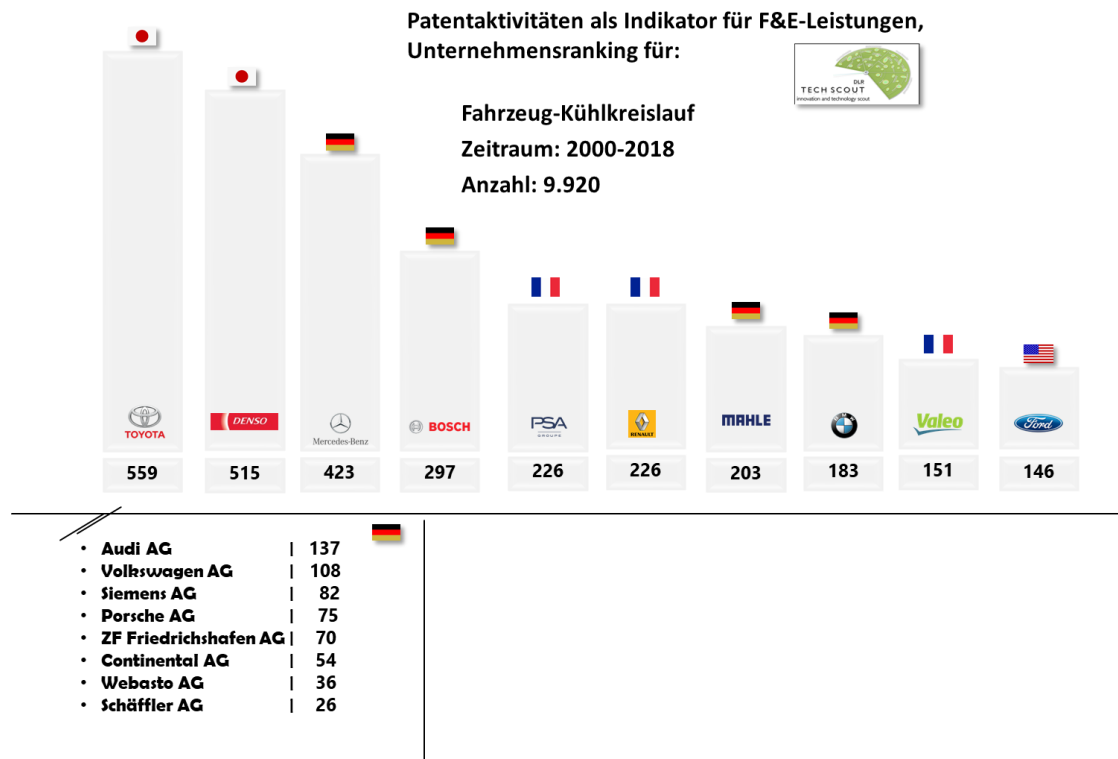


Abbildung 24: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Fahrzeugkühlkreislauf“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Thomas Weustenfeld: Heiz- und Kühlkonzepte für ein batterieelektrisches Fahrzeug basierend auf Sekundärkreisläufen. Göttingen: Cuvillier, 1. Auflage, 2017 (<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7627>)

Zhenying Zhang, Jiayu Wang, Xu Feng, Li Chang, Yanhua Chen, Xingguo Wang: The solutions to electric vehicle air conditioning systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Nr.91, 2018, S. 443–463

1.1.12 Thermomanagement

Aufgabe des Thermomanagements ist es, Energieströme im Fahrzeug zu steuern und so den Wärmehaushalt im Fahrzeug aus energetischer Sicht zu optimieren. Auf diese Weise soll die Motorkühlung in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren sichergestellt und damit mittelbar Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen gesenkt werden. Auf diese Weise soll für die Fahrzeuginsassen und insbesondere für die Fahrenden ein komfortables und belastungsarmes Kabinenklima erreicht werden. Dies hat Einfluss auf das Wohlbefinden der Insassen und auf die Konzentrationsfähigkeit der Fahrenden. Außerdem kann ein Beschlag der Scheiben durch eine richtige Klimatisierung verhindert werden, sodass eine gute Sicht gewährleistet wird. Damit trägt das Kabinenklima auch zur Sicherheit von Fahrenden und Fahrzeuginsassen bei.

Mithilfe des Thermomanagements soll den immer strenger werdenden Emissions- und Verbrauchsvorschriften sowie den Herausforderungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs begegnet werden. Das Thermomanagement spielt ebenso beim Downsizing eine bedeutende Rolle, da es im Zuge dessen immer schwieriger wird, die Wärme gut abzuleiten. Des Weiteren muss auch die Elektronik gekühlt werden, um eine Überhitzung zu verhindern. Auch dieser Herausforderung kann mit einem optimalen Thermomanagement entgegengewirkt werden.

Die Roadmap zum Modul „Thermomanagement“ umfasst die zwei zentralen Technologietrends „Kühlung ohne Kältemittel/Nur mit Wasser“ und „E-Fluid als Kühlmedium“. Diese zwei Technologien sind sehr weit entwickelt. Es werden nur noch beim Technologietrend „Kühlung ohne Kältemittel/Nur mit Wasser“ Impulse bei den Herstellungsverfahren erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich Fahrzeug-Thermomanagement wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Im Betrachtungszeitraum 2000–2018 konnten 2.097 Patente erkannt und ausgewertet werden. Hiernach ist nur Bosch als deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. US-amerikanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an. Weiterhin vertreten sind ein japanischer Zulieferer, ein südkoreanischer OEM, drei französische Unternehmen und erstmals auch chinesische Unternehmen. Im Vergleich zu den vorherigen Technologien investieren weniger deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

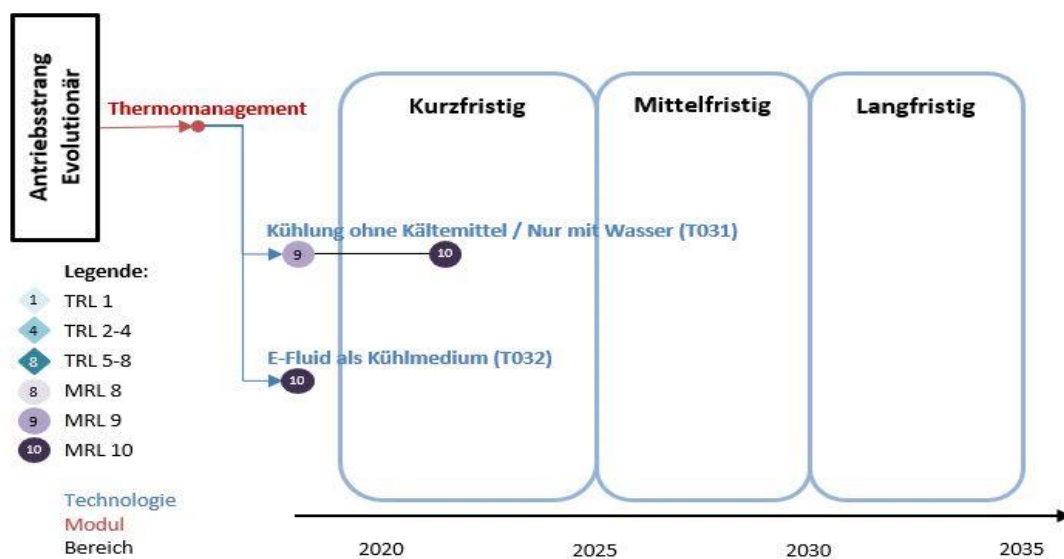


Abbildung 25: Roadmap „Thermomanagement“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Fahrzeug-Thermomanagement

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 2.097

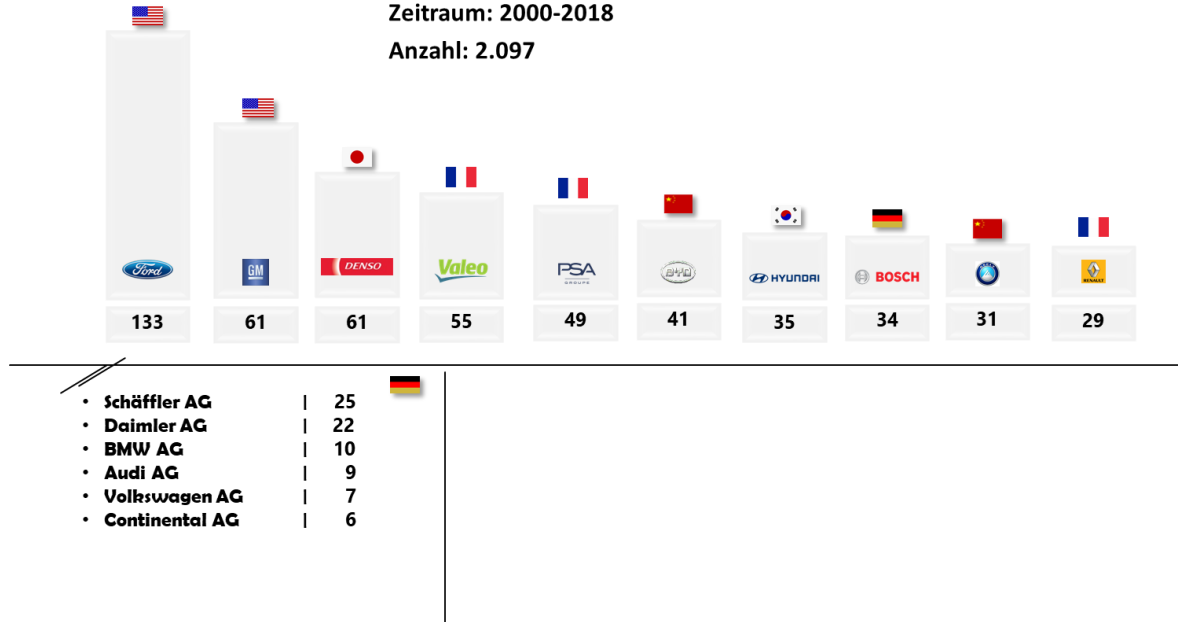


Abbildung 26: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Thermomanagement“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quelle:

Klemens Schmiederer (2011): Thermomanagement als Zukunftsaufgabe im Automobilbau. ATZ Extra, Jg. 16, Nr. 6, 2011, S. 66–71. DOI: 10.1365/s35778-011-0596-0, <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/thermodynamik---thermomanagement/thermomanagement-im-automobilbau/6560962> (abgerufen am: 21.03.2020)

1.2 Entwicklungen im elektrifizierten Antriebsstrang

Ein wesentlicher Entwicklungstrend im Automobilbereich ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Wichtigste Ursache hierfür sind die global vereinbarten Ziele zur Eindämmung des Klimawandels und die hierfür erforderliche Effizienzsteigerung und Abkehr von fossilen Brennstoffen („Defossilisierung“). Neben Klimaschutzmotiven stellt auch die lokale Luftreinhaltung einen wesentlichen Treiber der Elektrifizierung dar. So war die schlechte Luftqualität in vielen großen Städten Chinas Mitauslöser der Elektrifizierungsbestrebungen im Verkehrsbereich. Dasselbe trifft allerdings auch für viele weitere Großstädte überall auf der Welt zu, die eine intensive Wachstumsdynamik aufweisen.

In diesem Zusammenhang haben erste Länder einschneidende Maßnahmen, wie Zulassungsverbote von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (z. B. Norwegen ab 2025, Niederlande ab 2030, Vereinigtes Königreich ab 2035, Frankreich ab 2040) oder verbindliche Elektrifizierungsquoten für Herstellerflotten (China) angekündigt bzw. verabschiedet. Teilweise beziehen sich diese Beschränkungen nur auf reine Verbrennerfahrzeuge, das heißt Plug-in-Hybride sind ausgenommen.

Die Elektrifizierung von Fahrzeugen findet in verschiedenen Abstufungen statt: von unterschiedlichen Formen der Hybridisierung des konventionellen Antriebsstrangs bis zu rein elektrischen Antriebskonzepten. In Hybridfahrzeugen wird generell ein Verbrennungs- mit einem Elektroantrieb kombiniert, um den Verbrennungsmotor zum Beispiel verbrauchsoptimiert zu betreiben.

Plug-in-Hybride verfügen über eine größere Antriebsbatterie, die am Stromnetz geladen werden kann – und damit über eine höhere elektrische Reichweite. Das batterieelektrische Fahrzeug stellt ein reines Elektrofahrzeug dar, das E-Fahrzeug mit Reichweitenverlängerer (*Range Extender*) verfügt zusätzlich über einen Verbrennungsmotor zum Laden der Batterie während der Fahrt.

Nachteile elektrifizierter Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Antrieben sind die zum Teil noch eingeschränkte rein elektrische Reichweite sowie höhere Anschaffungskosten aufgrund des relativ kostenintensiven Batteriesystems.

Eine weitere Option ist das Brennstoffzellenfahrzeug, das aus Wasserstoff mittels einer Brennstoffzelle Strom erzeugt und damit einen Elektromotor antreibt. Für Leistungsspitzen und zur Rekuperation verfügt das Brennstoffzellenfahrzeug ebenfalls über eine Batterie. Die Fahrzeuge versprechen größere Reichweiten bei kurzen Tankzeiten, allerdings sind derzeit die Kosten vergleichsweise hoch und die Wasserstoff-Tankinfrastruktur nicht flächendeckend ausgebaut. Erste Brennstoffzellen-Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge werden derzeit in den Markt eingeführt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die aktuell absehbare technische Entwicklung der wichtigsten für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs erforderlichen Komponenten.

Zum Antriebsstrang im engen Sinn gehören der Traktions-Elektromotor sowie das Hybridgetriebe. Der elektrische Antrieb im weiteren Sinne umfasst zudem das Hochspannungsbordnetz, die Leistungselektronik – einschließlich deren Kühlung und des Ladesystems – sowie die Traktionsbatterie. Für Letztgenannte werden Zellchemie, Zellebene, Batteriesystemebene, Batteriemanagementsystem sowie Batterietemperierung differenziert.

Als weitere Antriebsoption werden die Brennstoffzelle und ihre wesentlichen Systembestandteile betrachtet. Betriebsrelevant sind insbesondere die Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse sowie die Distribution des Wasserstoffs.

Schließlich werden noch die aussichtsreichsten Syntheseverfahren für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe betrachtet.

1.2.1 Traktions-Elektromotor

Traktions-Elektromotoren dienen dem Antrieb eines Fahrzeugs. Eine große Herausforderung ist bislang die industrielle Herstellung dieser Elektromotoren, da aufgrund geringer Stückzahlen Sondermaschinen notwendig sind und viele Arbeitsschritte noch Handarbeit erfordern. Betroffen hiervon sind vor allem die Isolierung und die Wicklungen. Daher liegt momentan ein besonderer Fokus auf der Entwicklung von Isoliersystemen für Elektromotoren und von Wickeltechniken zu deren Herstellung, um eine kostengünstige und serielle Produktion zu ermöglichen.

Die Roadmap zum Modul „Traktions-Elektromotor“ umfasst die vier zentralen Technologietrends „Nadelwickeltechnik/Neue Wickeltechnik“, „Asynchronmaschine mit Kupfer-Käfig“, „Kühlkanäle direkt in der Wicklung“ und „Rechteckige Drähte für die Wicklungen“. Diese vier Technologien sind weit entwickelt und es werden lediglich beim Technologietrend „Kühlkanäle direkt in der Wicklung“ weitere Impulse bei den Herstellungsverfahren erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Traktions-Elektromotor“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt, insgesamt 60.881 Patente konnten für die Analyse herangezogen werden. Hiernach sind Bosch und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt, sowohl OEM als auch Zulieferer. Insgesamt investieren zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

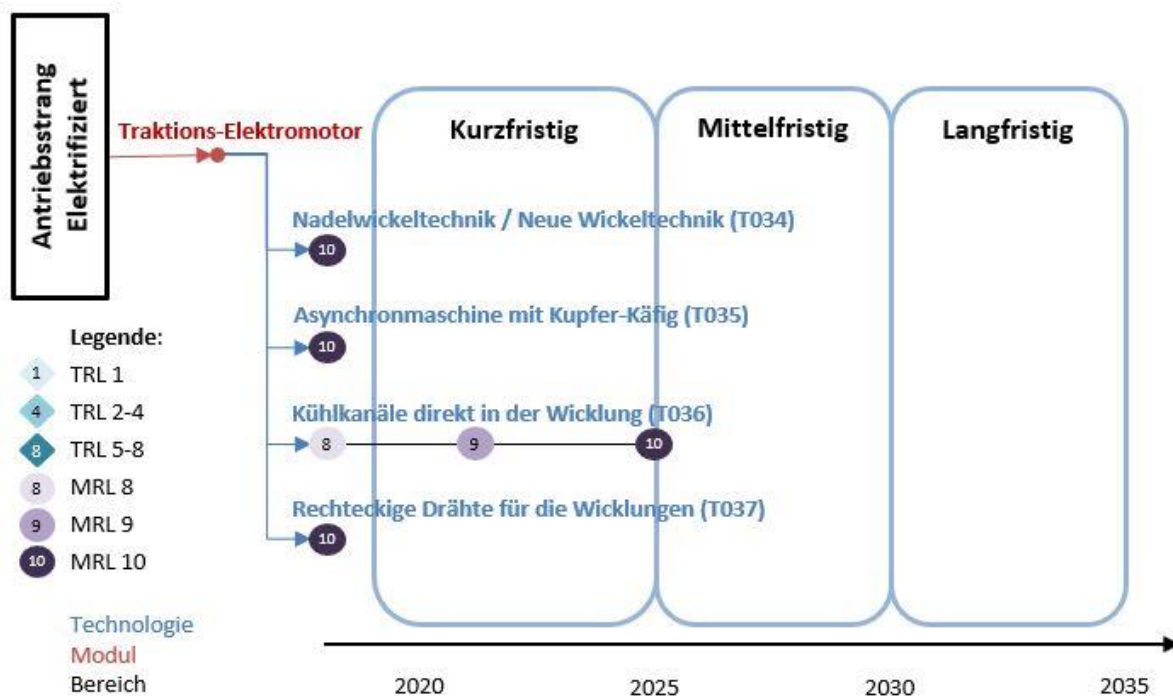


Abbildung 27: Roadmap „Traktions-Elektromotor“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Traktions-Elektromotor

Zeitraum: 2000-2015

Anzahl: 60.881

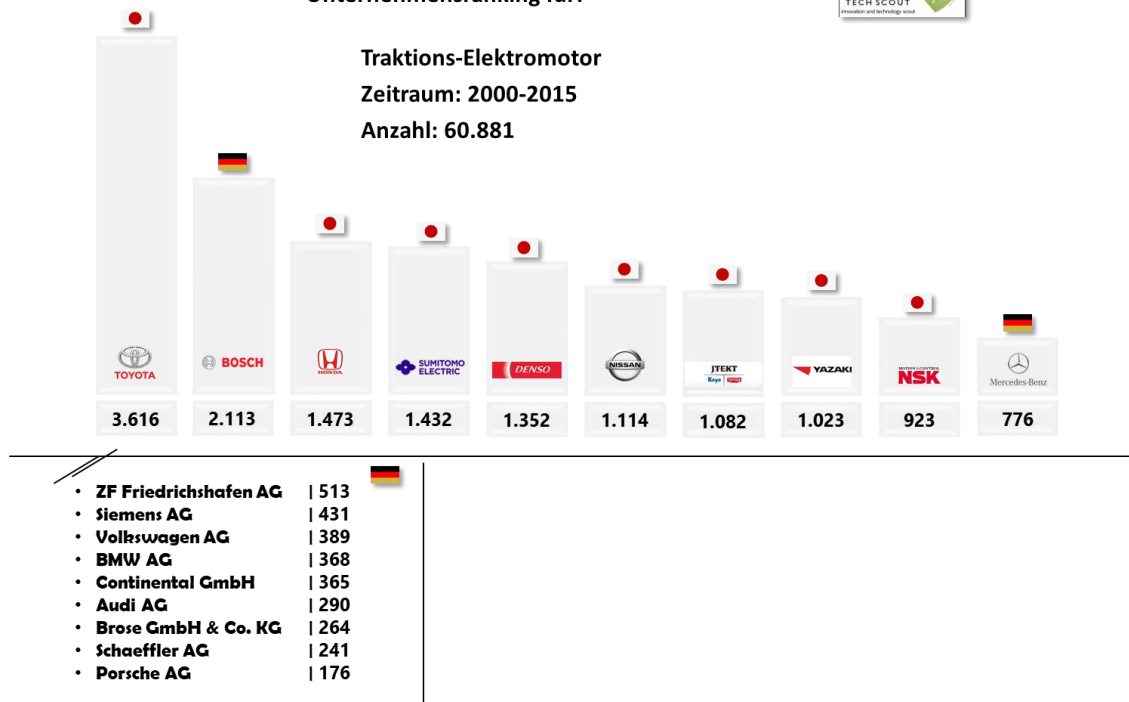


Abbildung 28: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Traktions-Elektromotor“ 2000–2015
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Claudia Weise: Elektromotoren mit Roboterhilfe: Von der Handarbeit zur Massenproduktion. In: Antriebssysteme. Effizient und integriert. VDMA Verlag, 2014, S. 34

Tobias Kestler: Konzept sowie mechanische Ausarbeitung einer hochdrehenden permanentmagneterregten Synchronmaschine: M04/17. Universität Bayreuth, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, 2017

1.2.2 Hybridgetriebe

Die *Dedicated Hybrid Transmissions* (DHTs), gefolgt von Add-on-Hybridgetrieben, sind die weltweit am meist verkauften Hybridgetriebe. Aufgrund der immer strengeren Gesetzgebung hinsichtlich der Reduktion der Schadstoffemissionen zeigt sich ein Trend in Richtung der Hybridisierung des Antriebsstrangs. Dieser soll in Zukunft bei gleichbleibender oder steigender Fahrzeugdynamik die CO₂-Emissionen reduzieren und die Fahrzeugsicherheit fördern.

Die Roadmap zum Modul „Hybridgetriebe“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „Getriebe mit integrierter E-Maschine ohne Zusatzbauraum“, „Funktionsweise über E-Maschine“ und „Baukastenlösungen“. Diese drei Technologien sind sehr weit entwickelt. Es wird in den nächsten fünf Jahren noch mit geringfügigen Entwicklungen beim Technologietrend „Funktionsweise über E-Maschine“ gerechnet. Für den Technologietrend „Baukastenlösungen“ werden weitere technologische Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Hybridgetriebe“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 14.996 Patente analysiert. Hiernach sind ZF, Schaeffler und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Ein japanisches Unternehmen führt das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, weitere US-amerikanische und ein südkoreanisches Unternehmen sind im Ranking vertreten. Außerhalb der Top Ten können BMW, Volkswagen, Porsche, Audi und Continental identifiziert werden, sodass im Vergleich zu vorherigen Analysen relativ wenige Firmen sowie deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung investieren und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv sind.

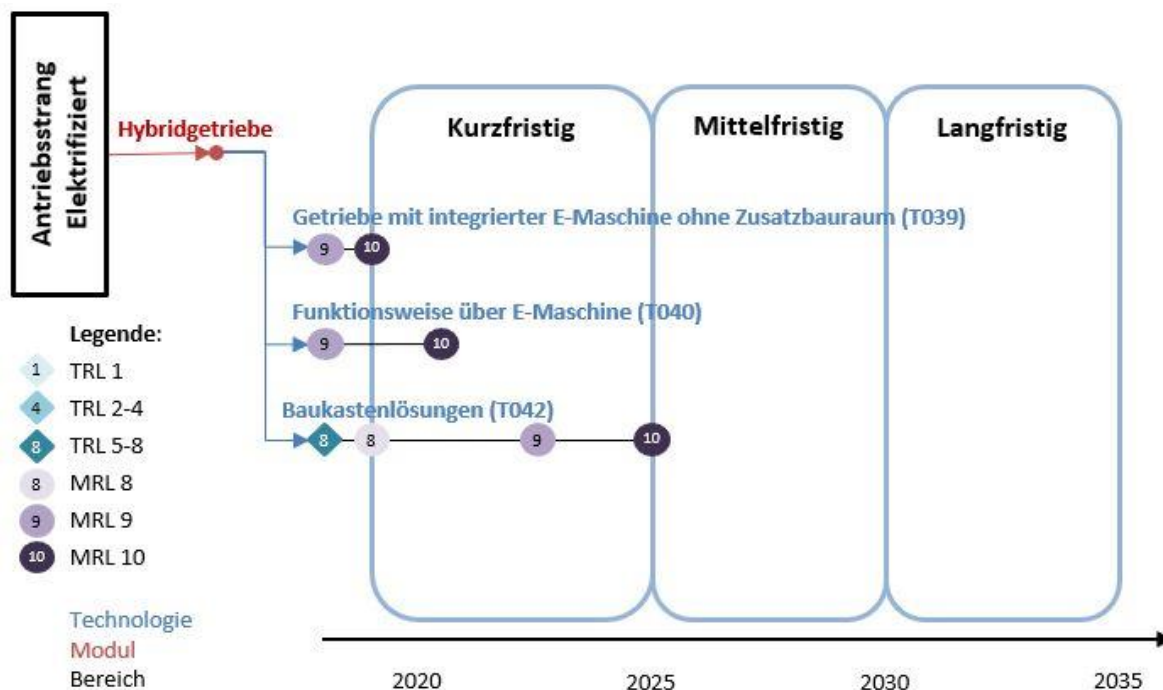


Abbildung 29: Roadmap „Hybridgetriebe“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

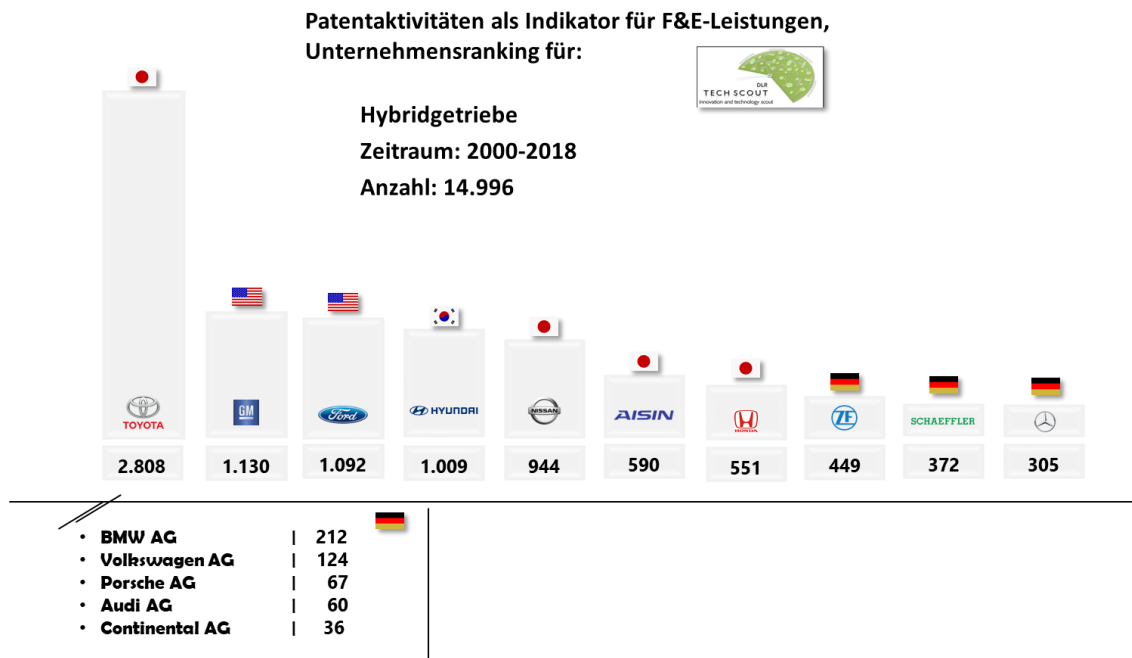


Abbildung 30: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Hybridgetriebe“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Stefan Schlott: Neue Kategorie von Hybridgetrieben, 2016, <https://www.springerprofessional.de/hybridgetriebe/neue-kategorie-von-hybridgetrieben/7104026> (abgerufen am: 21.03.2020)

Ferit Küçükay: Hybridgetriebe im Vergleich. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Jg. 119, Nr. 2, 2017, S. 82

1.2.3 Hochspannungsbordnetz

Die Aufgaben des Bordnetzes liegen zum einen in der Leistungsversorgung und zum anderen im Informationsfluss zwischen den Komponenten und Steuergeräten. Die Herausforderung, sparsame und emissionsfreie Fahrzeuge zu entwickeln und gleichzeitig Fahrkomfort sowie Sicherheit zu erhöhen, führt zu einem erhöhten Energiebedarf. Daher müssen auch die Bordnetze mehr Energie bereitstellen, d. h. höhere Spannungen bereitstellen, um den Strom niedrig zu halten.

Die Roadmap zum Modul „Hochspannungsbordnetz“ umfasst die zwei zentralen Technologietrends „Schirmfreie Hochvoltbordnetze“ und „800 V bis 1,2 kV“. In den kommenden zehn Jahren wird für beide Technologietrends mit weiteren technologischen Entwicklungen insbesondere hinsichtlich der Herstellungsverfahren gerechnet. Ein Erreichen von MRL 10 wird erst im mittelfristigen Zeithorizont 2025–2030 erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich Hochspannungsbordnetz wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt.

Als Ergebnis konnten 2.708 Patente identifiziert werden. Hiernach sind Bosch, Mercedes-Benz und BMW als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Ein japanischer OEM führt das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, wobei jeweils zwei US-amerikanische und südkoreanische Firmen vertreten sind. Insgesamt investieren acht deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

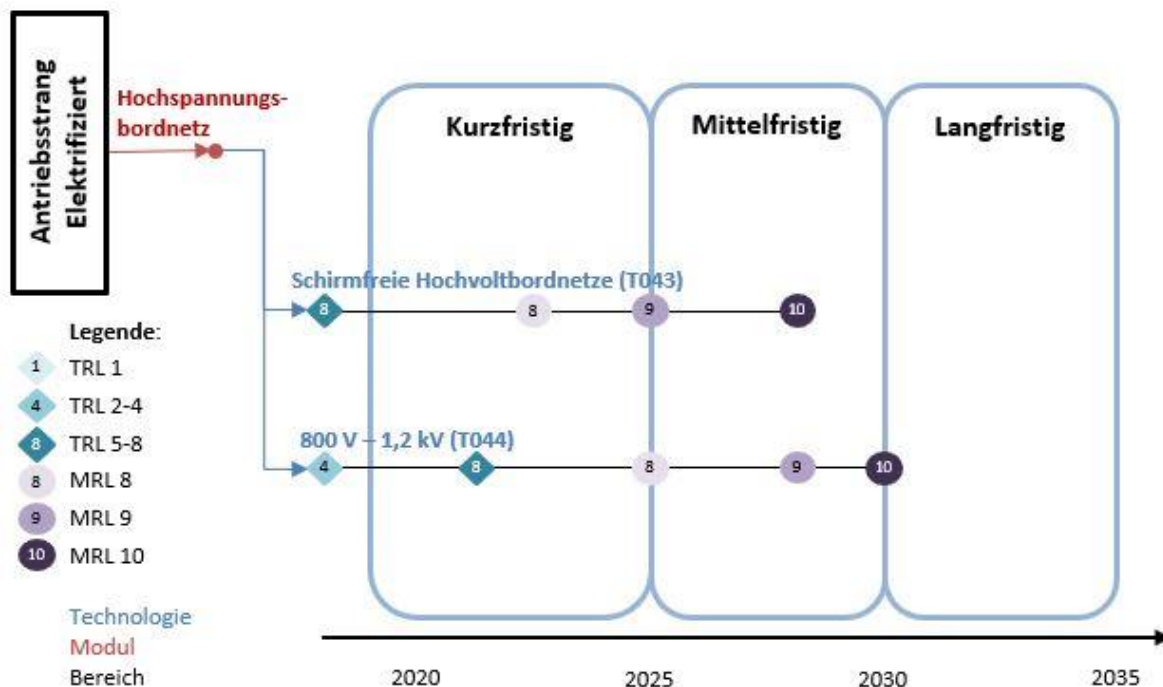


Abbildung 31: Roadmap „Hochspannungsbordnetz“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Hochspannungsbordnetz

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 2.708

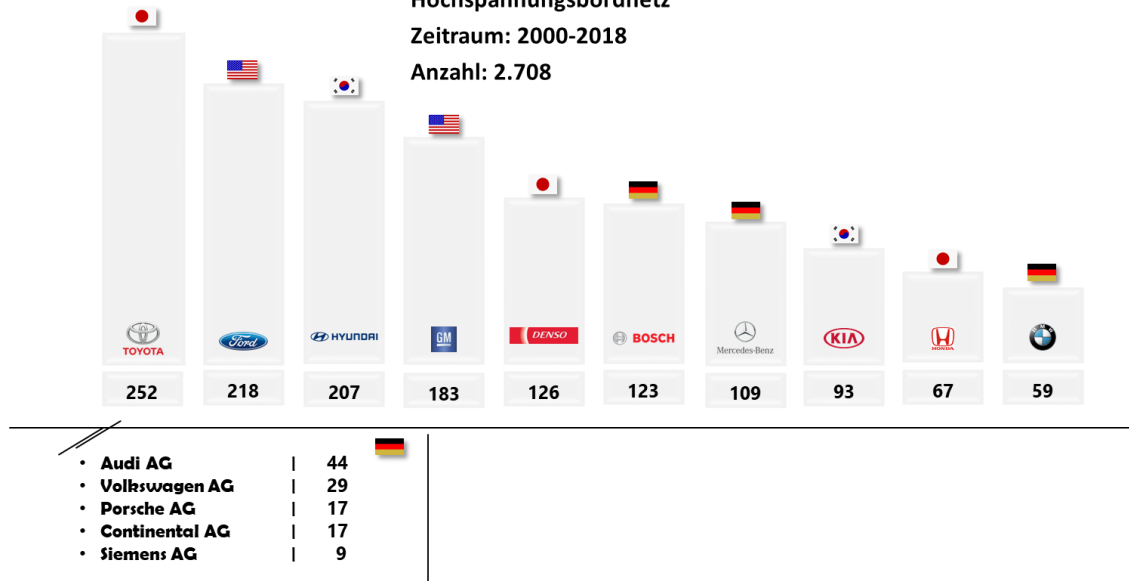


Abbildung 32: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Hochspannungsbordnetz“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Michael Schenk, Robert Kummer: Forschungsprojekt SafetE-car. In: Ressourceneffizienz: Springer, 2017, S. 107–118
Andreas Burkert: Mit 48 V wird es hochspannend. In: MTZ-Motortechnische Zeitschrift, Jg. 77, Nr. 1, 2016, S. 8–13

1.2.4 Leistungselektronik

Die Leistungselektronik ist eine der Hauptkomponenten des elektrischen Antriebstrangs in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Sie ist für die Ansteuerung der elektrischen Maschine, die Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung und die Diagnose des Antriebs zuständig.

Die Roadmap zum Modul „Leistungselektronik“ umfasst die vier zentralen Technologietrends „Entwicklung leistungselektronischer Bauteile komplett im digitalen Raum“, „Miniaturisierte und hocheffiziente Null-Totzeit-Treiber“, „Halbleiter auf Siliziumkarbid-Basis“ und „Halbleiter auf Galliumnitrid-Basis“. Der Technologietrend „Entwicklung leistungselektronischer Bauteile komplett im digitalen Raum“ ist bereits sehr weit entwickelt. Bei den anderen drei Technologietrends werden in den kommenden zehn Jahren noch deutliche technologische Entwicklungen, insbesondere hinsichtlich der industriellen Herstellung erwartet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Leistungselektronik“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 36.930 Patente im gesamten Betrachtungszeitraum erkannt.

Hiernach ist nur Bosch als deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt, ein weiterer südkoreanischer Hersteller kann identifiziert werden. Insgesamt investieren zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

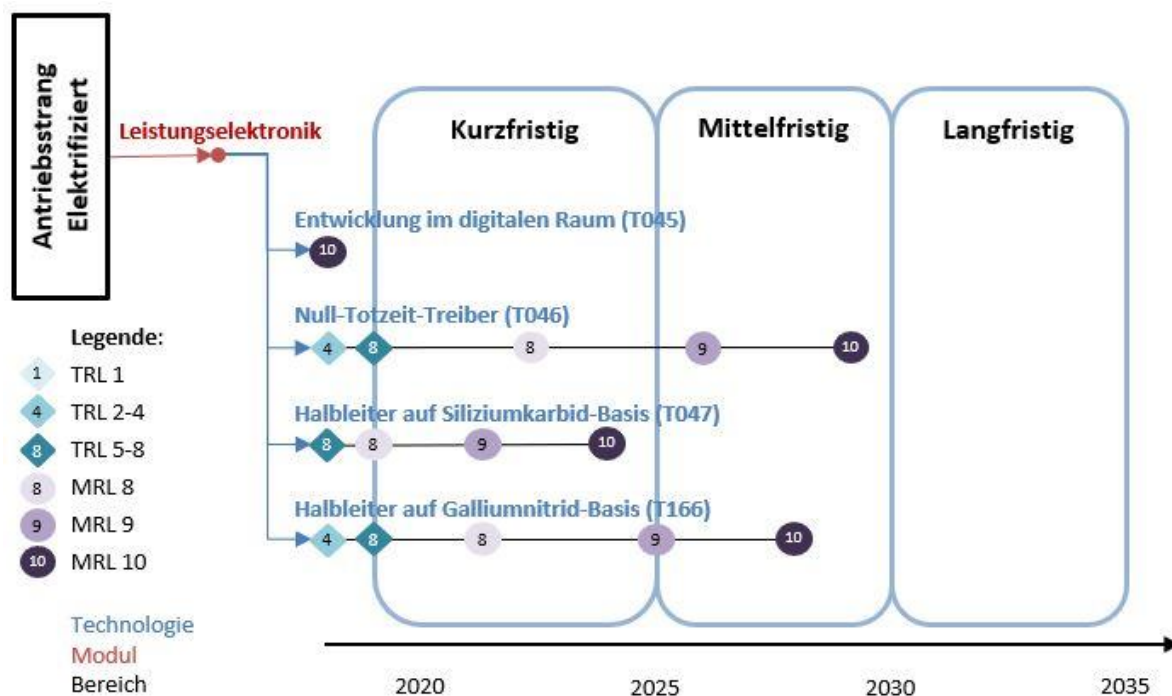


Abbildung 33: Roadmap „Leistungselektronik“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Leistungselektronik
Zeitraum: 2000-2015
Anzahl: 36.930

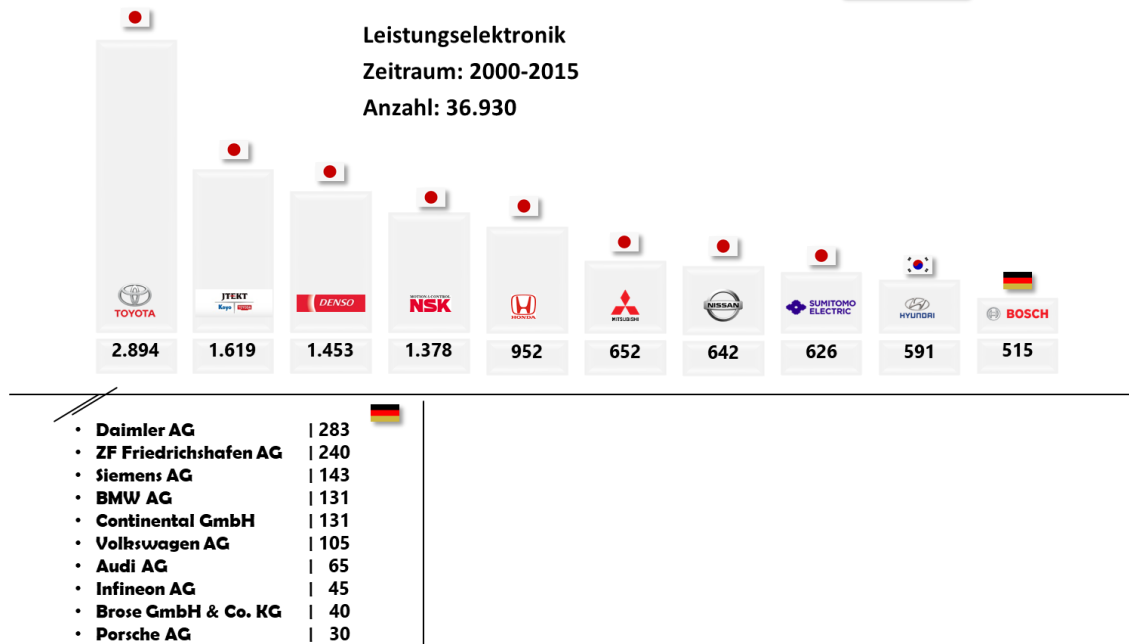


Abbildung 34: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Leistungselektronik“ 2000–2015
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

Joachim Specovius: Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme. Springer, 2018
Wilfried Hofmann, Manfred Stiebler: Leistungselektronik. In: Springer, 2018, S. 1843–1853

1.2.5 Leistungselektronik – Kühlung

Bei der Konvertierung von Energie in der Leistungselektronik entstehen Verluste in Form von Wärme. Diese Verlustleistung gilt es abzuführen, damit die Leistungshalbleiter nicht überhitzen und so zerstört werden.

Die Roadmap zum Modul „Leistungselektronik – Kühlung“ umfasst die zwei zentralen Technologietrends „Bionische Strukturen für einen integrierten Kühlkreislauf der Leistungselektronik“ und „Doppelseitiges gekühltes Leistungsmodul“. Beim Technologietrend „Doppelseitiges gekühltes Leistungsmodul“ werden zukünftig keine deutlichen technologischen Entwicklungen mehr erwartet. Beim Technologietrend „Bionische Strukturen für einen integrierten Kühlkreislauf der Leistungselektronik“ werden hingegen mittelfristig deutliche Impulse, insbesondere bei den Herstellungsverfahren angenommen.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Leistungselektronik – Kühlung“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Insgesamt konnten 459 Patente in diesem Bereich identifiziert werden.

Hiernach sind Bosch, Porsche, Mercedes-Benz, ZF und Continental als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Deutsche Unternehmen dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt, wobei auch ein japanischer, zwei US-amerikanische und ein französischer Hersteller aktiv sind. Sechs weitere deutsche Unternehmen investieren in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.



Abbildung 35: Roadmap „Leistungselektronik – Kühlung“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Leistungselektronik – Kühlung

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 459

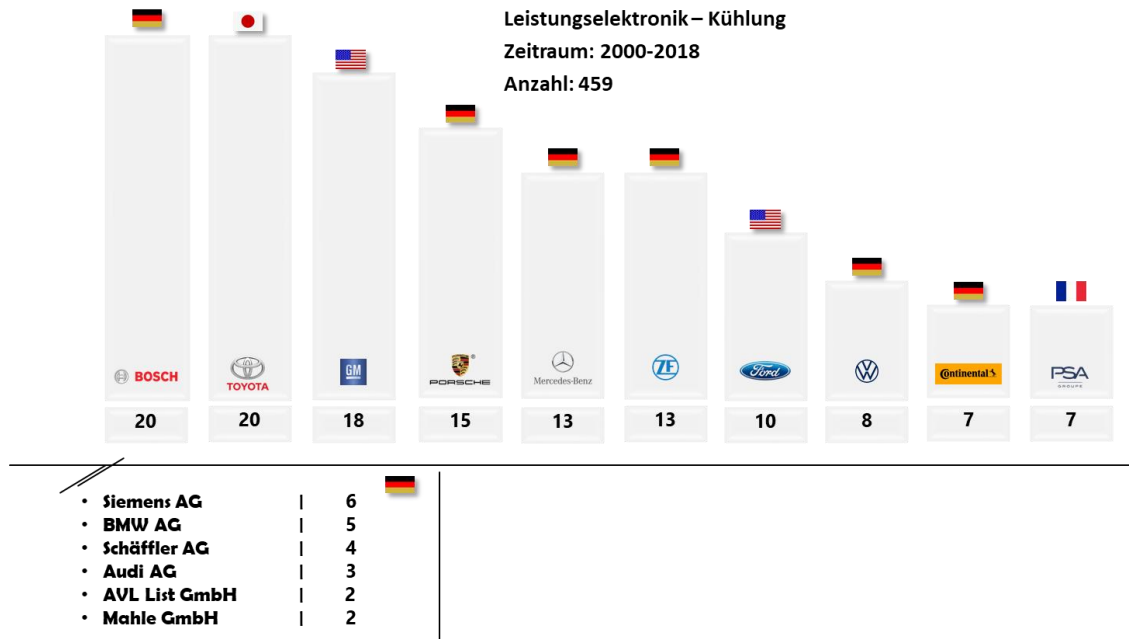


Abbildung 36: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Leistungselektronik – Kühlung“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

M. März: Thermisches Management in der Leistungselektronik. In: ECPE Workshop, 2017

Marc Hohmann, Benjamin Koschke, Timo Witzel: Die nächste Generation der automobilen Leistungselektronik. In: ATZechnik, Jg. 12, Nr. 3, 2017, S. 40–43

1.2.6 Leistungselektronik – Ladesystem

Bestandteil der Leistungselektronik in elektrifizierten Fahrzeugen ist die Batterie. Für deren Ladung liegen diverse Konzepte vor, entweder mittels eines Kabels oder kabellos (induktiv).

Die Roadmap zum Modul „Leistungselektronik – Ladesystem“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „Induktives Laden“, „900-kW-Ladestandard“ und „Standardisierung Zugang“. Diese drei Technologien sind bereits weit entwickelt und es wird zukünftig lediglich mit geringen Impulsen bei der industriellen Herstellung gerechnet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Leistungselektronik – Ladesystem“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. 401 Patente konnten identifiziert und ausgewertet werden.

Hiernach sind Bosch, Porsche, Mercedes-Benz und Continental als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Ein US-amerikanischer OEM führt das Ranking nach Patentzahl insgesamt an. Zwei weitere französische OEM sowie ein südkoreanischer Automobilhersteller komplettieren die Darstellung. Zwei weitere deutsche OEM und Zulieferer investieren in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.



Abbildung 37: Roadmap „Leistungselektronik – Ladesystem“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:



Leistungselektronik – Ladesystem

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 401

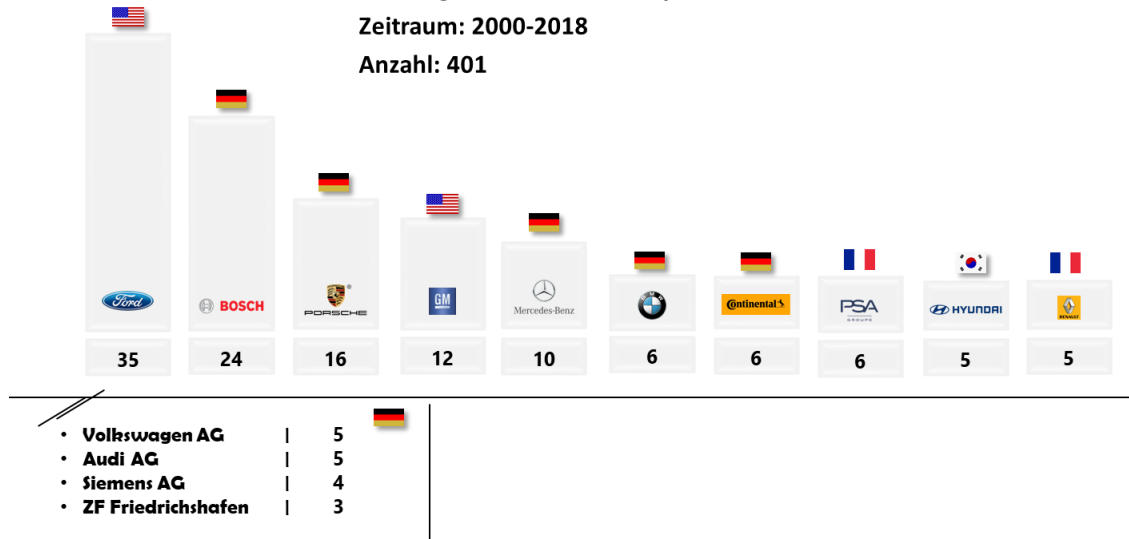


Abbildung 38: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Leistungselektronik – Ladesystem“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

A. Peters, C. Doll, F. Kley, M. Möckel, P. Plötz, A. Sauer, W. Schade, A. Thielmann, M. Wietschel, C. Zanker: Konzepte der Elektromobilität und deren Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Innovationsreport. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Arbeitsbericht Nr. 153, Oktober 2012

M. Hohmann, B. Koschke, T. Witzel: Die nächste Generation der automobilen Leistungselektronik. ATZechnik, Jg. 12, Nr. 3, 2017, S. 40–43

1.2.7 Traktionsbatterie – Zellchemie

Die Traktionsbatterie stellt eine zentrale Komponente elektrifizierter Fahrzeuge dar. Ihre Leistungsfähigkeit entscheidet über die Fahrzeugreichweite und -leistung im elektrischen Betrieb, die Schnellladefähigkeit, aber auch über einen beträchtlichen Teil des Fahrzeugpreises. Sie stellt die für den Fahrzeugantrieb und sämtliche weiteren Verbraucher (z. B. Pumpen, Heizung, Klimaanlage usw.) benötigte elektrische Energie bereit. Die Batterie besteht in der Regel aus einer Vielzahl parallel und seriell geschalteter Einzelzellen, die die elektrische Energie elektrochemisch speichern.

Im Hinblick auf die eingesetzte Zellchemie stellt aktuell die Lithium-Ionen-Technologie aufgrund ihrer gravimetrischen Energiedichte und ihrer Leistungsdichte den Stand der Technik dar. Der Begriff ‚Lithium-Ionen-Batterie‘ wird im Allgemeinen als Oberbegriff für eine Vielzahl unterschiedlicher Materialkombinationen benutzt. In der Regel bezieht sich der Name auf die chemische Zusammensetzung des verwendeten Materials auf der positiven Elektrode. Jede der verwendeten Zellchemien – man spricht auch von „Zellgenerationen“ – weist Stärken und Schwächen auf und ist dadurch für eine bestimmte Anwendung besser oder schlechter geeignet. Wichtige Kriterien neben Energie- und Leistungsdichte sind die Sicherheit, die Zyklenfestigkeit in Abhängigkeit von der Entladungstiefe, die kalendarische Lebensdauer, der Wirkungsgrad, die nutzbare Kapazität, die Selbstentladungsrate sowie die Kosten. Diese Kriterien können durch Modifikation der verschiedenen Materialien und Komponenten beeinflusst werden.

Die Roadmap zum Modul „Traktionsbatterie – Zellchemie“ umfasst sechs Zellgenerationen. Die Generationen 2b und 3a sind technisch weitgehend reif, Entwicklungen sind vor allem noch im Bereich der industriellen Herstellungsverfahren erforderlich. Demgegenüber ist für die Generationen 3b, 4a, 4b und 5 noch erheblicher technischer Entwicklungsaufwand zu leisten. Damit verbunden bestehen Unsicherheiten, welche der Technologien sich längerfristig etablieren werden.

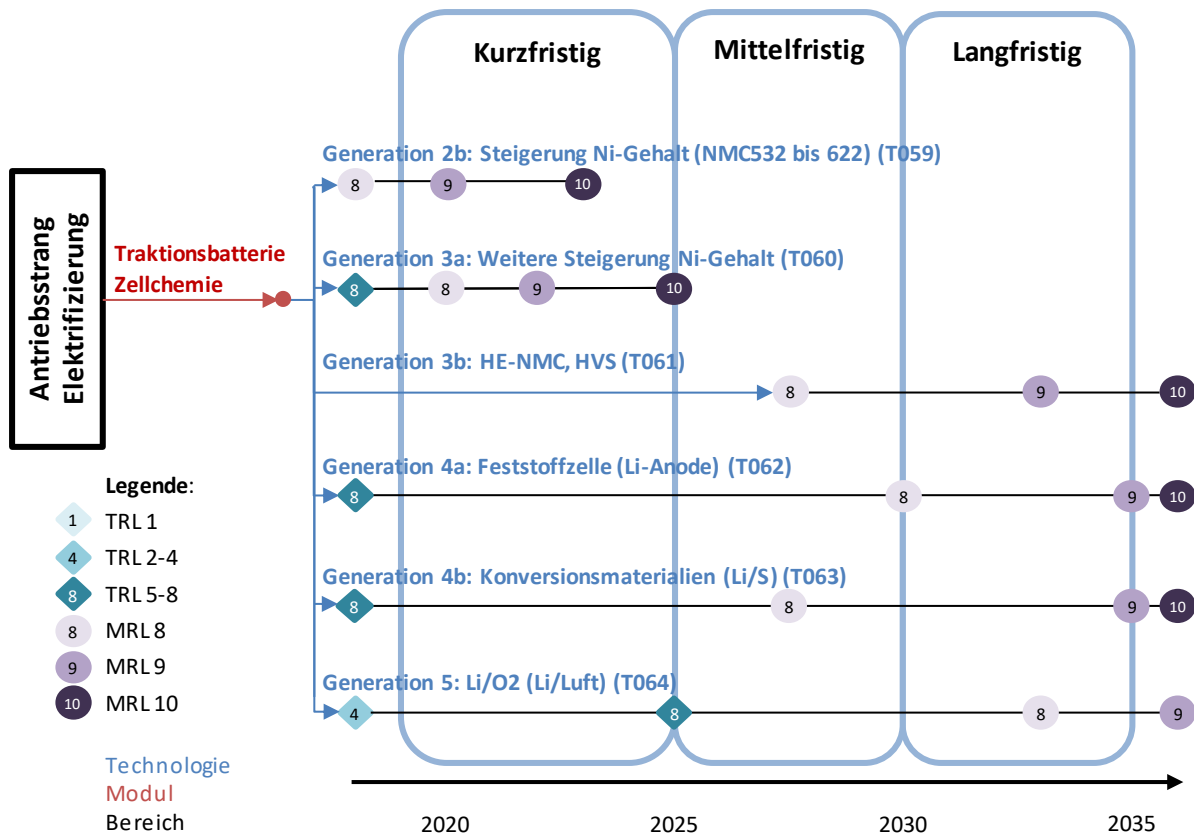


Abbildung 39: Roadmap „Traktionsbatterie – Zellchemie“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Aus Sicht der Zellchemie stellen die Generationen 1 (LFP – Lithium-Eisen-Phosphat, LMO – Lithium-Mangan-Oxid, NCA – Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid) und 2a (NMC111 – Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid mit gleichen Anteilen Ni, Mn und Co) nicht mehr den aktuellsten Stand der Technik dar und werden deshalb nicht weiter betrachtet. Die Generationen 2b und 3a zielen vor allem auf die Senkung des Gehalts von Kobalt ab, das knapp und teuer ist und dessen Produktion aus Gründen des Umweltschutzes und der Arbeitsbedingungen beim Abbau problematisch ist. Durch den Einsatz von Hochenergie-NMC (lithiumreiche integrierte Kompositmaterialien) oder Hochvolt-Spinellen (HVS: Li-Mn-basierte Oxide mit kubischer Struktur) wird eine Steigerung der Energiedichte bei geringeren Materialkosten angestrebt (Gen. 3b). In Feststoff- oder Solid-State-Systemen (Gen. 4a) werden der flüssige Elektrolyt und der Separator durch Feststoffelektrolyte, z. B. auf Polymer- und Keramikbasis, ersetzt und die Anode durch eine Lithium-Metall-Folie realisiert.

Zukunftstechnologien, wie die Kombinationen Lithium/Schwefel (Gen. 4b) und Lithium/Luft (Gen. 5) besitzen ein erhebliches Potenzial aufgrund ihrer hohen gravimetrischen Energiedichte. Allerdings ist noch weitgehend offen, ob sich der theoretisch nachgewiesene Vorteil auch praktisch umsetzen lässt. Deshalb sind Aussagen darüber, wann sich künftig ein Wechsel zu „Post“-Lithium-Ionen-Technologie vollziehen wird, kaum verlässlich möglich. Nach aktuellem Kenntnisstand ist zu erwarten, dass optimierte Lithium-Ionen-Batterien bis zu Generation 3 für die nächsten zehn bis 15 Jahre die zentrale Technologie für Traktionsbatterien darstellen werden. Es wird erwartet, dass sich die Batterietechnologien evolutionär weiterentwickeln und verschiedene Zellchemien nebeneinander auf dem Markt zu finden sein werden. Während neu am Markt eingeführte Technologien Vorteile im Hinblick auf Energiedichte, Schnellladefähigkeit usw. gegenüber etablierten Technologien aufweisen werden, dürften Letztere Preisvorteile haben, da die Produktionsverfahren immer weiter optimiert werden.

Die Patentaktivitäten zur Zellchemie werden dominiert von Unternehmen aus Japan und Südkorea, einzig Bosch auf Platz 9 ist als deutsches Unternehmen unter den Top Ten weltweit vertreten. Insgesamt neun deutsche Unternehmen investieren in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

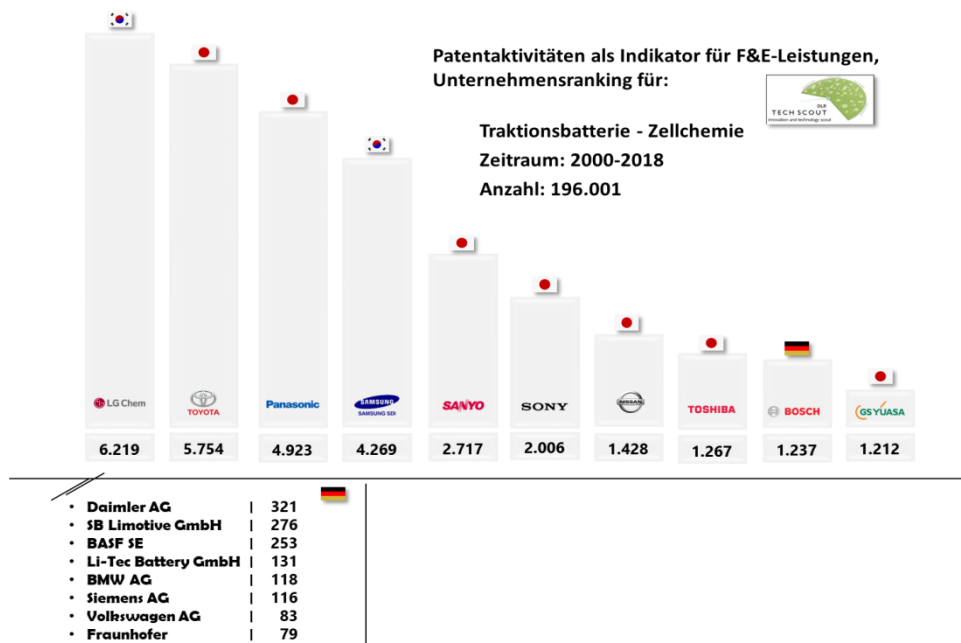


Abbildung 40: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Traktionsbatterie – Zellchemie“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

1.2.8 Traktionsbatterie – Zellebene

Eine Batteriezelle besteht aus einer positiven und einer negativen Elektrode, zwischen denen sich der ionenleitende Elektrolyt befindet. Die für die einzelnen Komponenten eingesetzten Materialien unterscheiden sich je nach verwendeter Zellchemie. Der Elektrolyt dient der Vermittlung zwischen den Reaktionen an den Elektroden und sichert den Transport der Lithiumionen zwischen den Elektroden. In aktuellen Batterien werden flüssige oder gelartige Elektrolyte verwendet, die in der Regel brennbare organische Lösungsmittel enthalten.

Die Traktionsbatterie wird aus einer Vielzahl einzelner Batteriezellen aufgebaut. Um die für den Fahrzeugbetrieb erforderliche Spannung zu erreichen, werden Zellen in der erforderlichen Anzahl zu Batteriemodulen (auch „Packs“) in Reihe geschaltet. Um die erforderliche Ladungsmenge und den maximalen Entladestrom zu erhalten, werden Zellen oder Batteriepacks in erforderlicher Zahl parallelgeschaltet. Aktuelle Elektrofahrzeuge enthalten bis zu mehrere Hundert einzelne Batteriezellen, die jeweils in einem eigenen Gehäuse eingefasst sind.

Die Roadmap zum Modul „Traktionsbatterie – Zellebene“ umfasst fünf zentrale Technologietrends. Bei „Stapeln statt Wickeln“ handelt es sich um eine weitgehend reife Technologie, „Stabile Separatoren“ und „Optimierung inaktiver Materialien“ sind in der Entwicklung weit fortgeschritten. Demgegenüber ist für „Wässrige Kathodenherstellung“ und „Bipolar-Stapelprinzip für Batterien“ noch erheblicher technischer Entwicklungsaufwand zu leisten.

Der Separator trennt die Elektroden elektrisch, ist aber durchlässig für die Ionen. Ihm kommt eine wichtige Rolle für die Sicherheit der Zellen zu: So muss er die mechanische Stabilität der Zelle im Fall einer Überhitzung mit anschließendem Brand gewährleisten. Die Entwicklung mechanisch und thermisch stabilerer Separatoren erhöht die Sicherheit der Zelle, erlaubt den Einsatz anderer Elektrolyte und hilft bei der Verringerung weiterer Sicherheitsvorkehrungen.

Je höher der Anteil der aktiven Materialien in einer Batteriezelle ist, desto größer ist deren Leistungsfähigkeit. Aus diesem Grund wird angestrebt, den Anteil inaktiver Materialien zu minimieren. Auf diese Weise lässt sich bei gleicher Masse bzw. gleichem Volumen mehr Energie speichern.

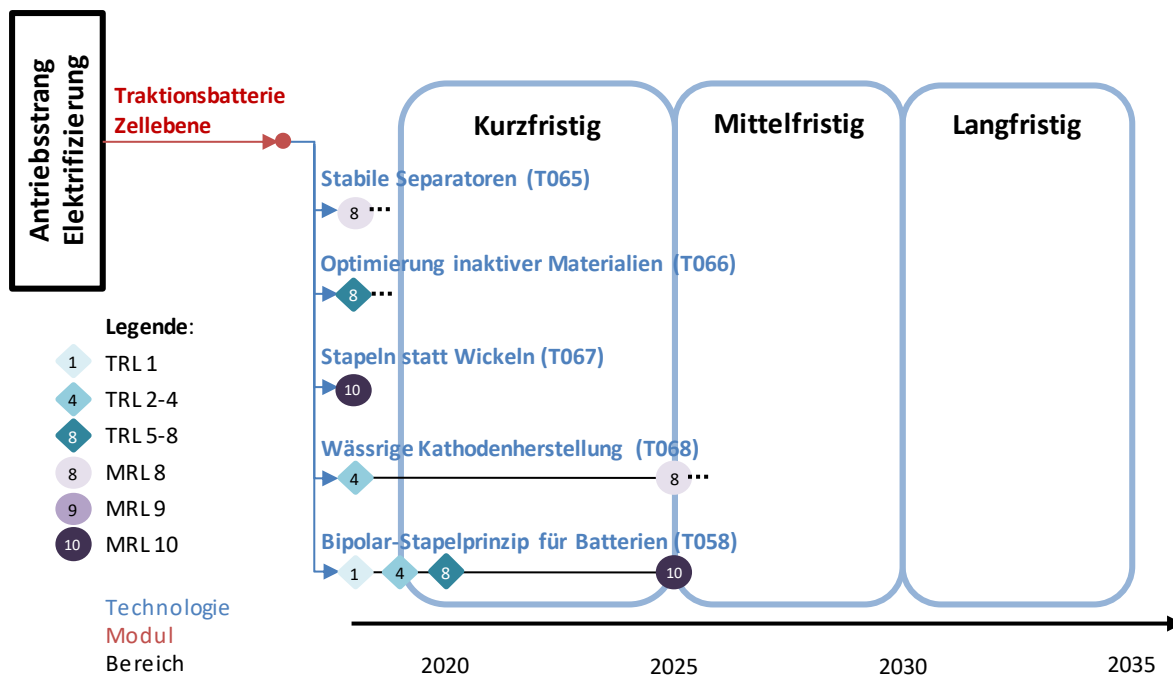


Abbildung 41: Roadmap „Traktionsbatterie – Zellebene“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Die Elektrodenpakete einer Batteriezelle können je nach Zellformat (zylindrisch, Pouch oder prisma-tisch) gewickelt oder gestapelt in das Zellgehäuse eingeführt werden. Das Stapeln der Elektrodenpakete verspricht einen höheren Zellfüllgrad und damit eine höhere Energiedichte. Aufgrund des Elektrodenformats ist die Stapel-Technologie nicht für zylindrische Zellen geeignet.

Bei der Herstellung von Elektroden werden aktuell meist organische Lösungsmittel eingesetzt. Die wässrige Kathodenherstellung strebt die Substitution organischer Lösungsmittel durch Wasser an und zielt auf eine Senkung von Kosten und Umweltbelastung. Wegen der Wasserempfindlichkeit vieler Zellkomponenten (nickelreiche Systeme, Elektrolyte) stehen den Vorteilen noch Probleme betreffend die Lebensdauer und Performance gegenüber.

Über das Bipolar-Prinzip, bei dem die Batteriezellen großflächig direkt übereinandergestapelt werden, kann der Aufbau für Kontakte und Gehäuse zwischen den Zellen weggelassen und so Bau-raum und Masse eingespart werden. Dieser Aufbau kann realisiert werden, indem ein gemeinsamer Elektroden-träger verwendet wird, auf dessen Vorderseite das Aktivmaterial der Kathode und auf dessen Rückseite das Aktivmaterial der Anode aufgebracht ist. Allerdings kann bei diesem Aufbau die elektrische Trennung der einzelnen Zellen Schwierigkeiten bereiten.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Traktionsbatterie – Zellebene“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europä-ischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 126.378 Patente für die Auswertung herangezogen. Hiernach sind Bosch und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit ver-treten. Zwei südkoreanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, ein weiterer südkoreanischer Hersteller sowie fünf japanische Unternehmen komplettieren die Darstel-lung. Insgesamt investieren zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

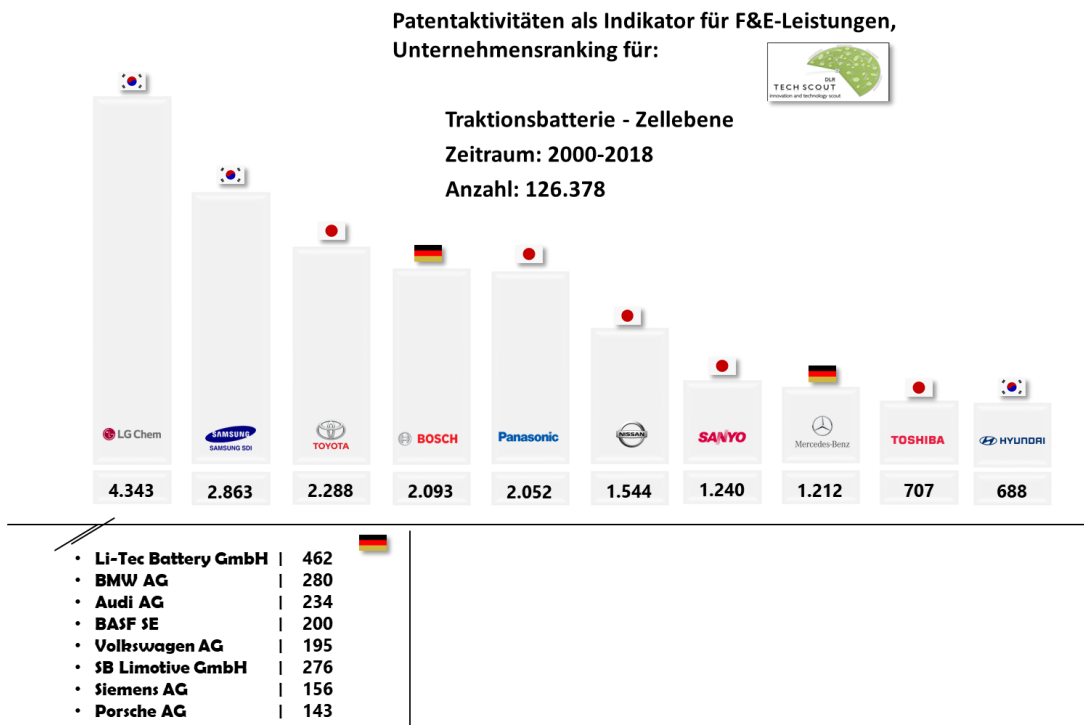


Abbildung 42: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Traktionsbatterie – Zellebene“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

1.2.9 Traktionsbatterie – Batteriesystemebene

Das Batteriesystem umfasst alle für das Funktionieren der Traktionsbatterie erforderlichen Komponenten. Hierzu gehören insbesondere die jeweils aus mehreren Einzelzellen zusammengesetzten Batteriemodule, das Batteriegehäuse sowie die Batterie-Junction-Box.

Die Roadmap zum Modul „Traktionsbatterie – Batteriesystemebene“ umfasst vier zentrale Technologietrends. Die Technologien „Neue Materialien für Batteriegehäuse“, „Steigerung Systemspannung auf 800 V“ und „Senkung Systemspannung auf 48 V“ sind bereits weit entwickelt, in den nächsten Jahren steht die Überführung in die industrielle Massenfertigung im Vordergrund. Demgegenüber ist für „Optimierte Battery-Junction-Box und neue Lösungen für Schütze“ noch erheblicher technischer Entwicklungsaufwand zu leisten.

Das Batteriegehäuse schützt die Batterie vor äußeren Umwelteinflüssen und fixiert die Komponenten des Batteriesystems in seinem Innenraum, um deren störungsfreie Funktion während des Fahrzeugbetriebs zu gewährleisten. Für das Gehäuse werden in der Regel Metallwerkstoffe, wie Stahl oder Aluminium, eingesetzt. Diese Werkstoffe erfüllen die Sicherheitsanforderungen, um die Batterie bspw. im Crashfall zu schützen oder um zur Schadensbegrenzung bei einer Fehlfunktion beizutragen.

Ebenso bestehen hohe Anforderungen an das Gehäuse bezüglich der Abschirmung der Batterie, um die elektromagnetische Verträglichkeit im Fahrzeug abzusichern. Der Einsatz neuer Materialien für Batteriegehäuse verspricht Einsparungen bei der Masse bzw. dem benötigten Bauraum. Der Einsatz neuer Materialien für oder innerhalb des Gehäuses umfasst eine große Bandbreite an Materialarten, wie z. B. Mica (Glimmer), superthermische Isolatoren, Leichtbaustoffe oder Phasenwechselmaterialien für die Wärmedämmung.

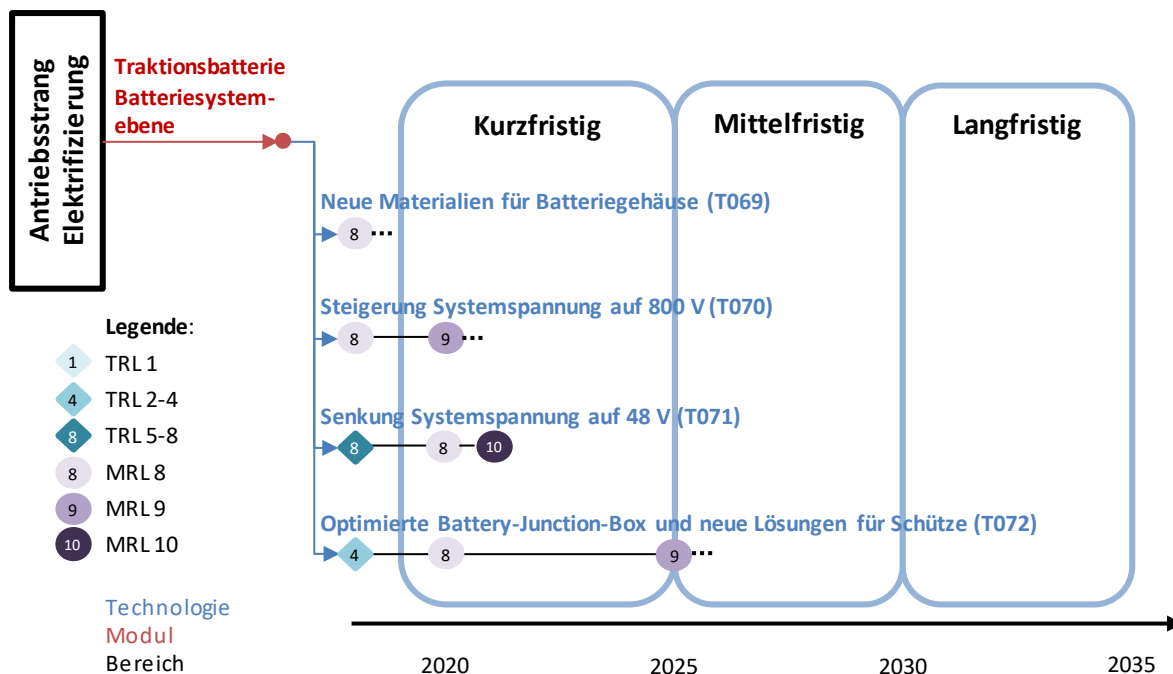


Abbildung 43: Roadmap „Traktionsbatterie – Batteriesystemebene“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

Mithilfe des Hochvoltnetzes werden einzelne Aggregate und Komponenten im Fahrzeug, die eine höhere Spannungsebene als die übliche 12-V-Bordspannungsebene besitzen, miteinander verbunden. Über das Hochvoltnetz wird beispielsweise die Hochvoltbatterie mit dem Inverter der Elektromaschine gekoppelt. Aktuelle Batteriesysteme für BEV und PHEV arbeiten mit einer Spannung von 400 V. Eine Erhöhung der Systemspannung auf 800 V ermöglicht die Steigerung der Batterieperformance bei Leistung und Bremskraft. Im Gegenzug erhöhen sich die Systemkosten. Für Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die Antriebsleistung (z. B. Flurförderfahrzeuge, Kleinfahrzeuge, PHEV) bietet die Verwendung einer Systemspannung von 48 V erhebliche Kostensenkungspotenziale.

Die Battery-Junction-Box enthält das Batteriemanagementsystem (BMS) sowie alle sicherheitsrelevanten Komponenten, wie Schütze/Relais. Diese Baueinheit soll im Hinblick auf Volumen, Masse und Kosten optimiert werden, wozu insbesondere konstruktive und werkstoffseitige Weiterentwicklungen des Schaltsystems und der Sicherheitskomponenten erforderlich sind.

Eine Analyse von Patentanmeldungen konnte für dieses Modul nicht durchgeführt werden, da für die betrachteten Technologien keine trennscharfe Eingrenzung geeigneter Suchbegriffe möglich war.

Quellen:

www.emobil-sw.de/de/service/system/komponenten/detail/batteriegehaeuse.html (abgerufen: Juni 2019)

VDE (Hrsg.): *Kompodium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. Frankfurt a. M., Juli 2015

1.2.10 Traktionsbatterie – Batteriemanagementsystem (BMS)

Das Batteriemanagementsystem (BMS) stellt eine Kernkompetenz im Elektrofahrzeug dar. Die primäre Aufgabe des BMS ist es, die Einzelzellen einer Antriebsbatterie zu schützen und die kalendarische Lebenszeit bzw. die Zyklenanzahl zu optimieren. Als Kontrollparameter werden die vom Zellüberwachungssystem ermittelten Größen Zellspannung und Zelltemperatur verwendet. Zusätzlich wird der Batteriestrom über den Gesamtstrommesser des Hochvoltmoduls bestimmt. Aus diesen drei Eingangsgrößen berechnet das BMS den Ladezustand SoC (*State of Charge*) und die Alterung SoH (*State of Health*) der Batterie. Überdies wird die Reichweite bzw. der *State of Function* (SoF) des Fahrzeugs aus den errechneten Parametern SoC und SoH ermittelt.

Die Roadmap zum Modul „Traktionsbatterie – Batteriemanagementsystem“ umfasst vier zentrale Technologietrends. Die Technologie „Stromzähler mit zwei bis drei physikalischen Messbereichen“ ist bereits relativ weit entwickelt. Demgegenüber ist für die Technologien „Sensorlose Temperaturbestimmung“, „Elektronik für Automotive- und stationäre Anwendungen“ sowie „Online elektrochemische Impedanzspektroskopie“ in den kommenden Jahren noch erheblicher technischer Entwicklungsaufwand zu leisten.

Durch die Ausstattung von Batteriesystemen mit Stromzählern, die über zwei bis drei physikalische Messbereiche verfügen, können die Ströme präziser gemessen und dadurch der SoC der Batterie genauer ermittelt werden. Dies ermöglicht eine bessere Ausnutzung der Batteriekapazität bei gleichzeitiger Verringerung der Alterung.

Die indirekte (sensorlose) Temperaturbestimmung basiert auf der Analyse von Abweichungen der Zellarbeitsspannung. Sie dient der exakteren Bestimmung des Zustands einzelner Zellen. Die resultierende bessere Überwachung des Batteriesystems erlaubt es, auffälliges Verhalten von Zellen frühzeitig zu erkennen und durch das BMS entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Neben verbesserter Batteriesicherheit und nutzbarer Kapazität würde die Zellalterung bei sinkendem Verkabelungsaufwand reduziert.

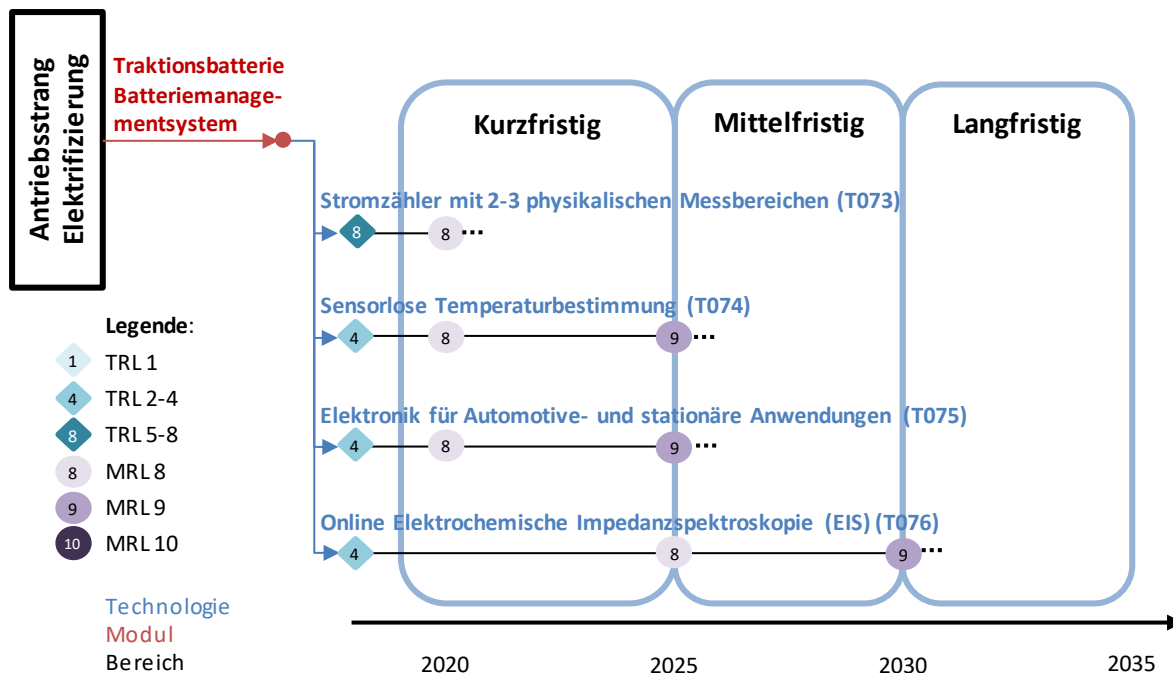


Abbildung 44: Roadmap „Traktionsbatterie – Batteriemanagementsystem“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

Die Elektronik in aktuellen Batteriesystemen ist stark anwendungsbezogen (mobil, stationär) ausgelegt, weshalb die Systeme ohne Modifikation nur für die jeweilige Anwendung gut geeignet sind. Eine Auslegung und Optimierung der Batterieelektronik sowohl für den Einsatz im Fahrzeug als auch als stationärer Energiespeicher würde die Second-Life-Nutzung erleichtern.

Die online elektrochemische Impedanzspektroskopie bestimmt die Impedanz elektrochemischer Systeme als Funktion der Frequenz einer Wechselspannung. Die Analyse der Frequenzspektren ermöglicht Rückschlüsse auf den Zustand von Batteriezellen und erlaubt damit eine verbesserte Steuerung des Batteriesystems.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Traktionsbatterie – Batteriemanagementsystem“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Insgesamt konnten 9.324 Patente ermittelt werden. Hiernach ist nur Bosch als deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Ein südkoreanischer OEM führt das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, weitere folgen auf den Plätzen drei, vier und acht. Neben einem US-amerikanischen und einem japanischen Unternehmen sind auch chinesische Institutionen in der Darstellung stark vertreten. Wenige deutsche Firmen investieren in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

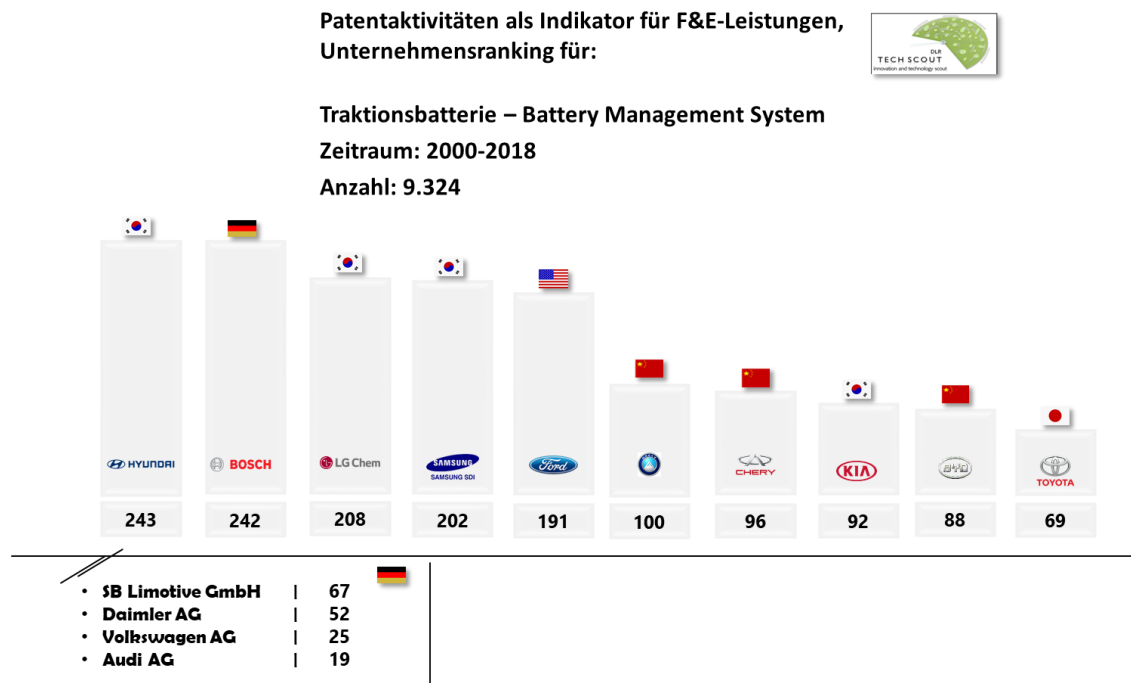


Abbildung 45: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Traktionsbatterie – Batteriemanagementsystem“ 2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

R. Dorn et al.: Batteriemanagementsystem. In: R. Korthauer (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin Heidelberg: Springer, 2013

VDE (Hrsg.): Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Frankfurt a. M., Juli 2015

1.2.11 Traktionsbatterie – Batterietemperierung

Die Zellen eines Batteriesystems lassen sich nicht bei jeder Temperatur gleich gut und gleich lange nutzen. Die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Lithium-Ionen-Zellen ist zwischen 20 °C und 40 °C am besten. Je weiter die Temperatur unter 20 °C liegt, desto höher werden die Innenwiderstände dieser Zellen und desto geringer ist die dem Antrieb zur Verfügung gestellte Leistung. Unter 0 °C altern Lithium-Ionen-Zellen außerdem besonders schnell oder nehmen sogar irreversiblen Schaden bis hin zum Kurzschluss. Gleiches gilt für Temperaturen oberhalb von 40 °C. Bei besonders hohen Temperaturen kann sich der Elektrolyt thermisch zersetzen und die Zelle infolgedessen in Brand geraten. Aufgabe des Temperierungskonzepts ist es, die Temperatur aller Zellen des Batteriesystems innerhalb des Bereichs der bestmöglichen Leistungsfähigkeit und Lebensdauer zu halten.

Die Roadmap zum Modul „Traktionsbatterie – Batterietemperierung“ umfasst vier zentrale Technologietrends. Die Technologien „Homogenisierung der Zelltemperatur“, „Stationäre Zusatzkühlung bei Schnellladung“ und „Latentwärmespeicher“ sind bereits relativ weit entwickelt. Die Technologie „Temperierung mit nicht leitenden Fluiden“ weist noch Entwicklungsbedarf auf, allerdings ist in den nächsten Jahren mit einer vergleichsweise schnellen technologischen Reife zu rechnen.

Durch die Homogenisierung der Temperatur innerhalb einer Zelle wird eine gleichmäßige Alterung der einzelnen Zellen angestrebt. Erreicht werden kann diese Homogenisierung durch ein im Hinblick auf die Wärmeverteilung optimiertes Zelldesign sowie den Einsatz von Kühlsystemen und entsprechend optimierter Gehäuse.

Die bei der Schnellladung von Batterien eingesetzten hohen Ladeströme können zu einer enormen Belastung des Materials mit der Gefahr vorzeitigen Alterns führen. Der Einsatz von Flüssigkeitskühlung sowohl der Batterie als auch der Ladekabel kann unerwünschte Effekte vermeiden.

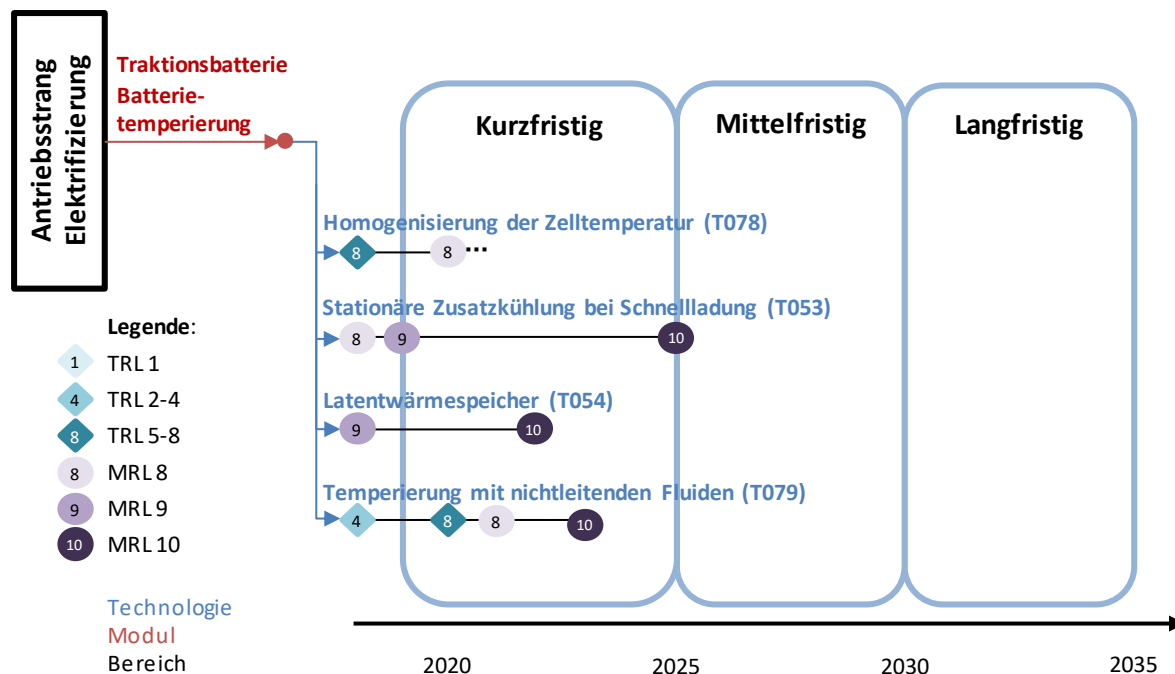


Abbildung 46: Roadmap „Traktionsbatterie – Batterietemperierung“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Durch den Einsatz metallischer Latentwärmespeicher kann Wärme auf einem hohen Energie-niveau gespeichert werden. Das Funktionsprinzip basiert auf der bei einem Phasenübergang aufgenommenen bzw. abgegebenen Energie, der sogenannten latenten oder verborgenen Energie. Neben Reichweite und Komfort soll durch die latenten Energiespeicher auch die Gesamteffizienz des Fahrzeugs gesteigert werden.

Beim Konzept der Temperierung mit nicht leitenden Fluiden werden Batteriezellen vollständig von einer nicht leitenden Flüssigkeit umschlossen, was zu einer direkten und über die gesamte Zelle hinweg homogenen Abfuhr der Wärmeentwicklung führt. Das Kühlmittel wird dabei von Pumpen durch das Kühlsystem zirkuliert.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich Traktionsbatterie-Temperierung wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 27.723 Patente konnten identifiziert werden. Hiernach sind Bosch und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Ein japanischer OEM führt das Ranking nach Patentzahl insgesamt an. Weitere japanische, südkoreanische sowie ein US-amerikanisches Unternehmen vervollständigen die Darstellung. Insgesamt sind zahlreiche deutsche Firmen in der Technologieentwicklung und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

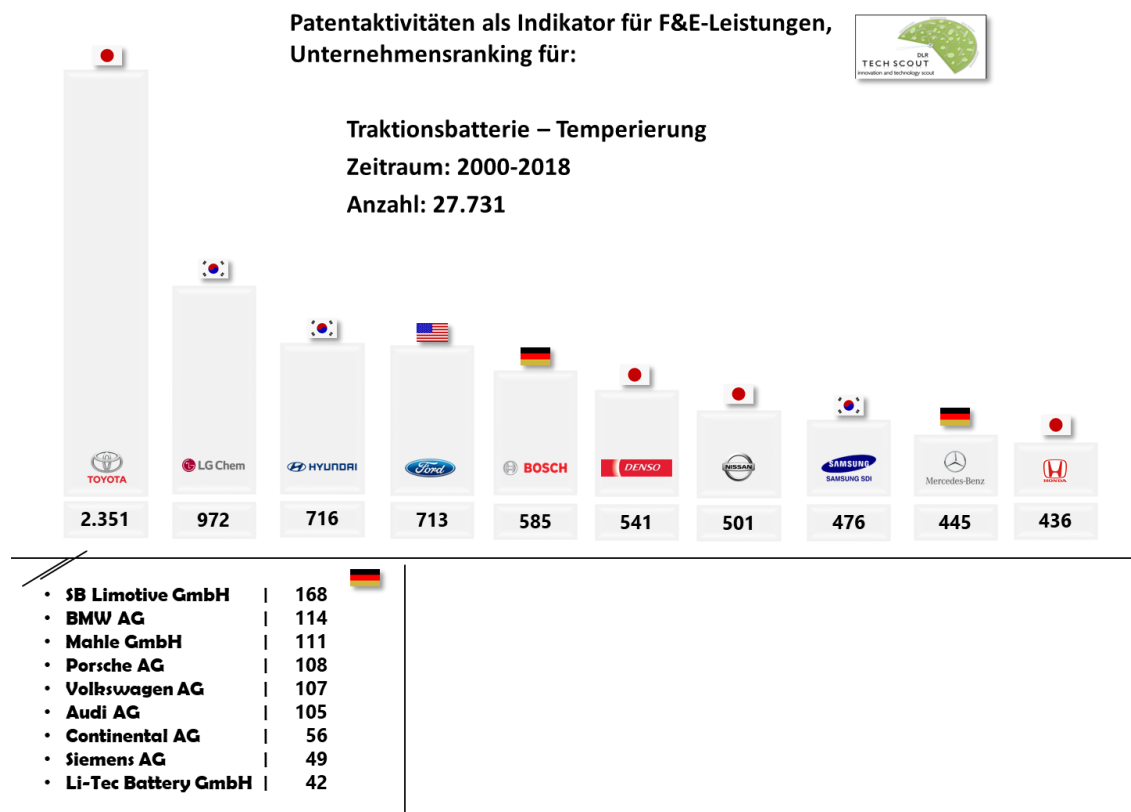


Abbildung 47: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Traktionsbatterie – Batterietemperierung“
2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

Quellen:

e-mobil BW (Hrsg.): *Strukturstudie BWe mobil 2015. Elektromobilität in Baden-Württemberg*. Stuttgart, 2015

VDE (Hrsg.): *Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. Frankfurt a. M., Juli 2015

1.2.12 Brennstoffzelle

Neben der batterieelektrischen Mobilität ist die Wasserstoffmobilität mit Brennstoffzelle ein alternativer Pfad zur Nutzung elektrischer Energie im Verkehr. Der Einsatz von Wasserstoff ist ebenso vorteilhaft hinsichtlich der lokalen Emissionsbelastung. Nicht nur CO₂, sondern auch andere Verbrennungsprodukte (NO_x, Staub, SO_x etc.) entfallen und die Lärmemission ist vergleichbar mit einem batterieelektrischen Fahrzeug. Weitere Vorteile sind Tankgeschwindigkeit und Fahrzeugreichweite, denn diese entsprechen wiederum Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Neben diesen Vorzügen bestehen aber auch Herausforderungen: So bedarf es des Aufbaus einer eigenen Infrastruktur (Wasserstoff-Erzeugung und -Verteilung) und der Wirkungsgrad der Gesamtwirkkette (Strombereitstellung zu Fortbewegung) ist rund Faktor zwei besser als bei einem Verbrennungsmotor, jedoch ebenso rund Faktor zwei schlechter als beim batterieelektrischen Fahrzeug. Hinzu kommt ein noch geringes Fahrzeugangebot der Hersteller.

Als frühe Märkte werden Nachfrager mit energieintensivem Fuhrpark gesehen, beispielsweise im Busverkehr (ÖPNV), im Schienennahverkehr (Dieselersatz) oder im Güterverkehr. Alle genannten Fahrzeuge bewegen sich auf definierten Routen mit festen Startpunkten und Endzielen, sodass sich kosteneffizient eine Basisinfrastruktur mit Tankstellen errichten und dann erweitern lässt.

Die Roadmap zum Modul „Brennstoffzelle“ umfasst fünf Technologietrends: „PEM-Brennstoffzelle“, „Membran-Elektrodeneinheit (MEA)“, „Nanopartikel: Katalysator mit Platin und Kobalt“, „Thermomanagement“ und „Deionisiertes Kühlmittel“. Im Vordergrund stehen in den nächsten fünf Jahren technologische Weiterentwicklungen und vor allem Veränderungen bei den MRL bzw. den automatisierten Herstellungsverfahren.

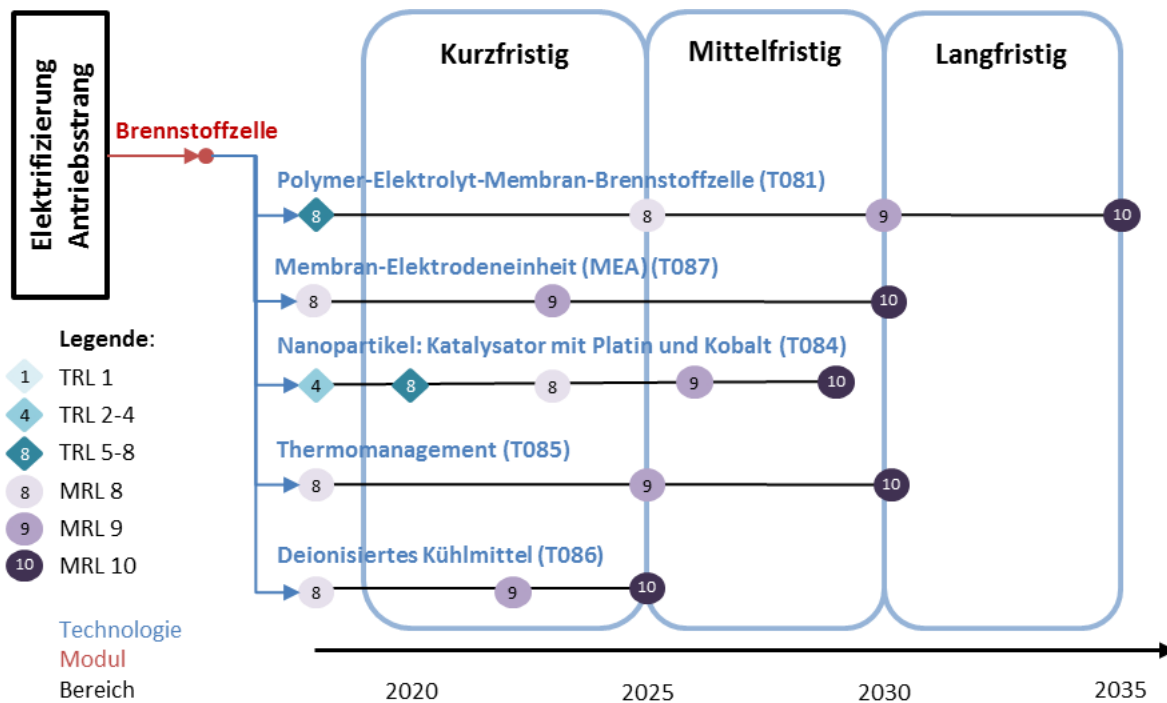


Abbildung 48: Roadmap „Brennstoffzelle“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

Für den mobilen Einsatz wird die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle, T081) entwickelt. Ein Brennstoffzellensystem besteht aus dem *Stack* (Brennstoffzellenstapel) als Herzstück, dem Wasserstoffspeicher und den Peripheriegeräten. Die Nebenaggregate umfassen vor allem Leitungen und Schläuche, Mess-, Regel- und Steuerungstechnik, Ventile, Pumpen, Kühler etc. Die Hauptkosten des Systems werden durch den *Stack* verursacht. Hier besteht jedoch Kostensenkungspotenzial mittels Automatisierung des Herstellungsprozesses. Durch eine wachsende Nachfrage werden Fertigungsverbesserungen erwartet und damit Kostensenkungspotenziale erzielt. Synergien werden auch durch Nachfrage aus anderen Anwendungsfeldern gesehen. Da PEM-Elektrolyse und PEM-Brennstoffzelle technologisch ähnlich sind, werden sich gegenseitig beeinflussende Skaleneffekte erwartet.

Der Gesamtmarkt für die Technologie, getrieben durch den Fahrzeugmarkt (inkl. ÖPNV und Güterverkehr), die Heiztechnik (Brennstoffzellenheizgeräte als Ersatz für konventionelle Erdgasheizungen) und die Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse ist international im Aufbau. Ein Markt im Bereich von Millionen-Stückzahlen und Milliarden-Umsatz ist vorstellbar.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Brennstoffzelle“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Im gesamten Betrachtungszeitraum wurden für die Auswertung 20.796 Patente erkannt und betrachtet. Hiernach ist nur Mercedes-Benz als deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an. Ein südkoreanisches sowie zwei US-amerikanische Unternehmen komplettieren die Darstellung. Insgesamt investieren zahlreiche deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

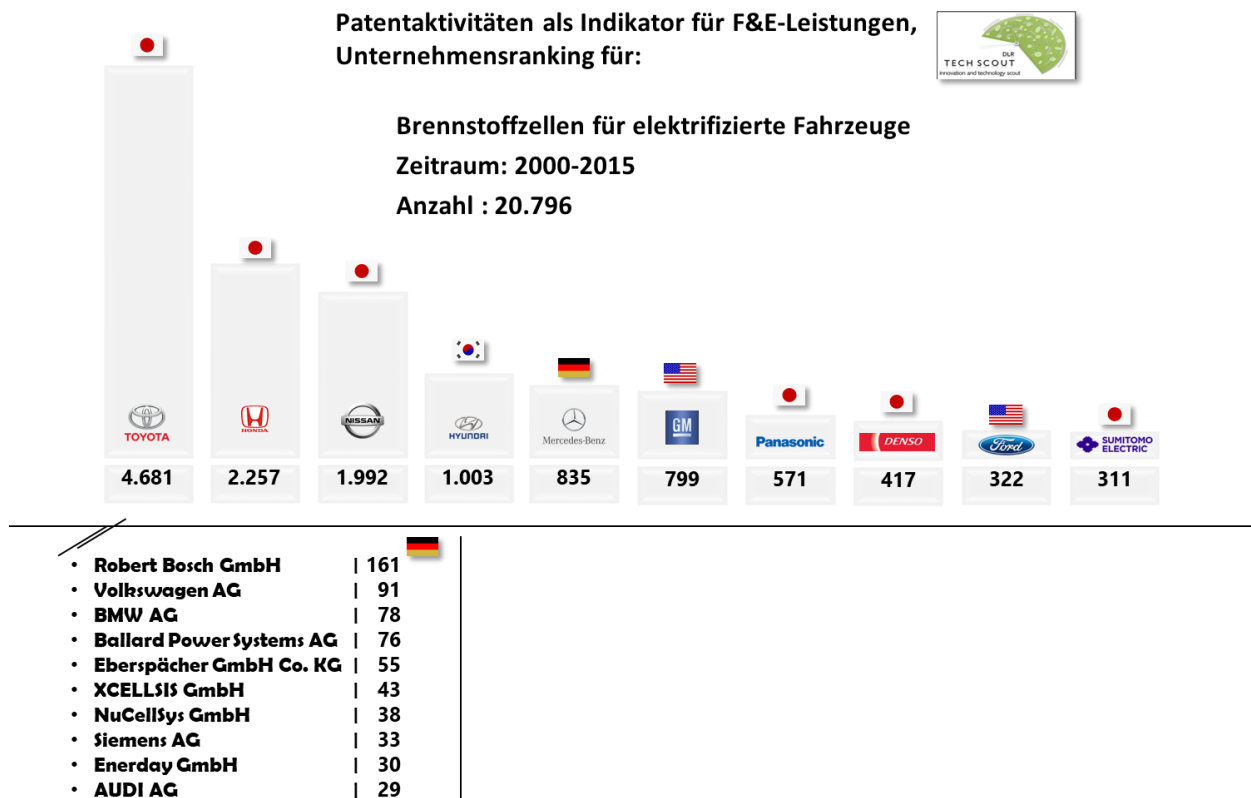


Abbildung 49: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Brennstoffzelle für elektrifizierte Fahrzeuge“ 2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

1.2.13 Elektrolyse

Eine Alternative zur batterieelektrischen Mobilität zur Elektrifizierung des Antriebstrangs bietet der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen. Wasserstoff liegt in der Natur jedoch nicht in Reinform vor, weswegen er für die Nutzung extra hergestellt werden muss. Eine Möglichkeit besteht darin, mittels Elektrolyse aus elektrischer Energie Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Durch den Einsatz regenerativen Stroms entsteht ein CO₂-neutraler Energieträger, der im Verkehrssystem (Pkw, Lkw) genutzt werden kann.

Lässt man die Perspektive auf den Verkehrssektor zunächst außen vor, bietet die Elektrolyse-Technologie einen Systembaustein, um elektrische Energie in einen chemischen Energieträger zu wandeln und dann in unterschiedlichen Anwendungsgebieten wie dem Wärmemarkt, zur Stromspeicherung, als chemischer Grundstoff für nachfolgende Syntheseschritte oder eben im Verkehr einzusetzen – daher wird auch von einer Sektorkopplungstechnologie gesprochen. Diese Besonderheit ist relevant für die Technologiebewertung. Denn es werden gleichzeitig mehrere Herausforderungen der Transformation des Energiesystems adressiert. Zudem können Synergien bei den Herstellungsprozessen von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen gefunden werden, sodass ein internationaler Markt im Multi-Megawatt- und Milliarden-Euro-Bereich vorstellbar ist.

Wasserstoff als Kraftstoff spielt dennoch eine besondere Rolle bei der Elektrolyse-Technologieeinführung. Im Verkehrsbereich bestehen allgemein eine höhere Zahlungsbereitschaft und eine niedrigere Preissensitivität als in anderen Sektoren. Daher wird neben kleineren Nischenanwendungen besonders der Verkehr als Nukleus betrachtet.

Die Roadmap zum Modul „Elektrolyse“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „Alkalische Elektrolyse (AEL)“, „Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL)“ und „Festoxid-Elektrolyse (SOEL)“. Diese drei Technologien sind bisher unterschiedlich weit entwickelt. Kurzfristig werden vor allem Fortschritte bei der industriellen Herstellung der AEL- und PEM-Elektrolyse durch Skaleneffekte erwartet. Bei der Hochtemperaturelektrolyse wird mittelfristig die technologische Entwicklung hin zur Marktverfügbarkeit angestrebt.

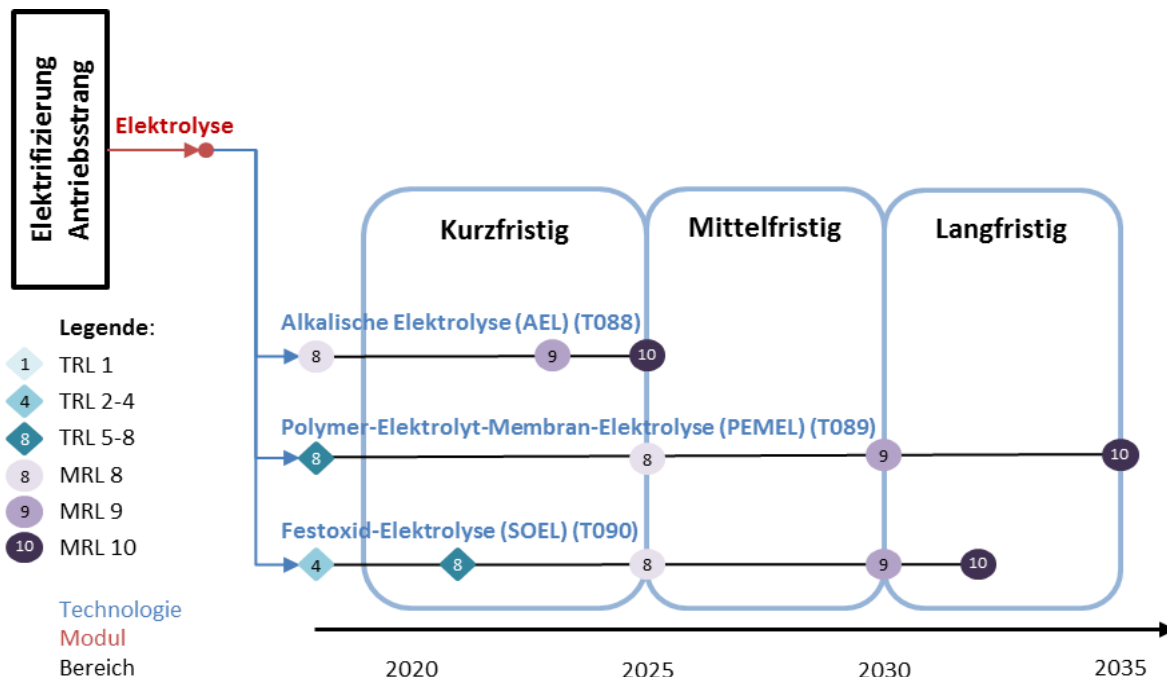


Abbildung 50: Roadmap „Elektrolyse“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Abbildung 50 illustriert die Roadmap der Elektrolyse-Technologien. Die alkalische Elektrolyse ist in der Entwicklung und Industrialisierung aktuell als am weitesten fortgeschritten einzustufen, PEM-Elektrolyse und Festoxid-Elektrolyse (SOEL) sind noch weniger weit entwickelt. Allerdings ist dies lediglich eine Momentaufnahme in einem sehr dynamischen Entwicklungsbereich. Die Wasserstofftechnologie erfährt wegen einer Vielzahl möglicher Einsatzgebiete aktuell (Stand 2020) besondere Aufmerksamkeit. Dies bewirkt eine Verbreiterung der Förder- und Forschungslandschaft und dadurch schwierig zu prognostizierende zeitliche Entwicklungspfade. Die Bundesregierung stimmt beispielsweise eine nationale Wasserstoffstrategie ab, die sich im Frühjahr 2020 in der ministerialen Abstimmung befindet. Bereits im Dezember 2019 erhielten deutschlandweit 16 Regionen eine Unterstützung für Wasserstoffprojekte im Rahmen der BMVI-Initiative „Hy Land – Wasserstoffregionen in Deutschland“.

Eine Analyse von Patentanmeldungen konnte für dieses Modul nicht durchgeführt werden, da für die betrachteten Technologien keine trennscharfe Eingrenzung geeigneter Suchbegriffe möglich war.

Quellen:

Wuppertal Institut (Hrsg.): *TF_Energiewende: Technologien für die Energiewende: Status und Perspektiven, Innovations- und Marktpotenziale – eine multikriterielle vergleichende Technologieanalyse und -bewertung*. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, April 2018

Smolinka et al.: *Studie IndWEde – Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*. Berlin, 2018

Liebner et al.: *Weiterentwicklung von Verfahrensführung und Technologie der Hochtemperatur-Dampf-Elektrolyse | HOT ELLY Phase IIb*. Frankfurt a. M., März 1987

1.2.14 Wasserstoffversorgung – Distribution

Der Begriff ‚Wasserstoffdistribution‘ umfasst die Fragestellungen, wie der Energieträger von der Erzeugungsanlage zum Endanwender gelangt und bei diesem zwischengespeichert und im Fahrzeug mitgeführt wird.

Die Roadmap zum Modul „Wasserstoffversorgung – Distribution“ umfasst die sechs zentralen Technologietrends „Leitungsgebundener Wasserstoff-Transport“, „Trailer zum Wasserstoff-Transport“, „350 bar/750 bar H₂-Speicher“, „Flüssigwasserstoffspeicher“, „Cryo-compressed-Technologie“ und „Adsorptions-/Absorptionsspeicher“. Bei den vier Erstgenannten handelt es sich um eher reife Technologien, die Cryo-compressed-Technologie und Adsorptions- und Absorptionsspeicher müssten noch für die Nutzung im Verkehr weiterentwickelt werden.

Gravimetrisch ist Wasserstoff ein sehr leichter Energieträger bzw. weist einen hohen Energieinhalt auf (1 kg Wasserstoff enthält etwa 33 kWh; 1 kg Benzin/Diesel etwa 10–12 kWh). Allerdings nimmt Wasserstoff im Normzustand ein großes Volumen ein (12 000 l Wasserstoff entsprechen etwa 1 l Benzin). Daher muss Wasserstoff für den Transport und die Speicherung verdichtet werden. Hier haben sich zwei Druckniveaus für die Betankung von Fahrzeugen etabliert. Die 350-bar-Technik wird bei großen Fahrzeugen (ÖPNV-Busse und Schienen-Triebfahrzeuge) und im Schwerlaststraßenverkehr angewandt (geringere Platz-Restriktion). Bei Pkw wird hauptsächlich die 700-bar-Technik eingesetzt (enge Volumenbegrenzung im Fahrzeug). Gleichermaßen bedarf es bei der Tankstelleninfrastruktur der Differenzierung der Druckniveaus.

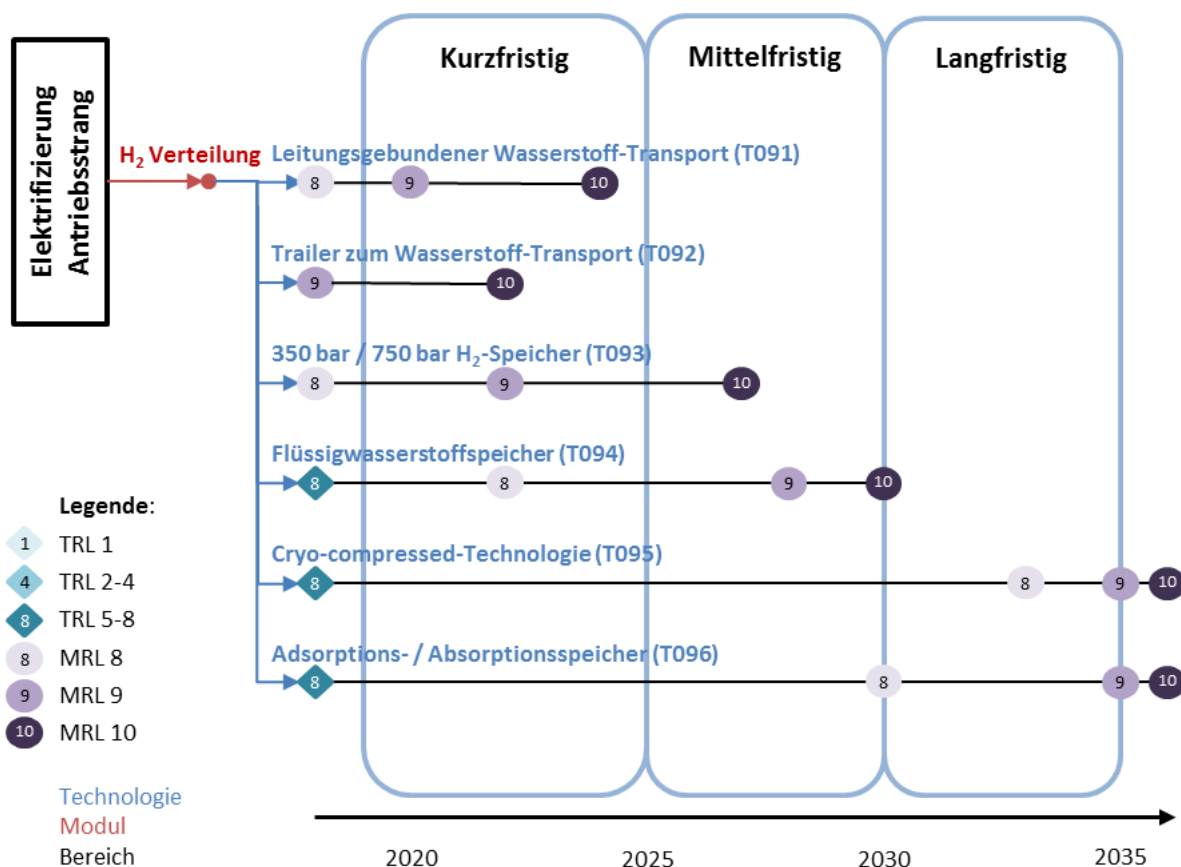


Abbildung 51: Roadmap „Wasserstoffversorgung – Distribution“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Eine Alternative zur Druckerhöhung besteht in der Kühlung und Verflüssigung des Wasserstoffs. Hierzu werden jedoch Temperaturen von -253 °C benötigt. Soll die Energiedichte noch weiter erhöht werden, kann die Cryo-compressed Technology angewandt werden, wobei der Wasserstoff auf -220 °C abgekühlt und gleichzeitig mit 1000 bar verdichtet wird. Auf diese Weise werden die größten Energiedichten erreicht. Dennoch hat sich das Verfahren aktuell nicht durchgesetzt, denn neben der Anforderung der Druckfestigkeit muss der Tank zusätzlich eine sehr gute thermische Isolation aufweisen. Die vollständige Verhinderung eines Wärmeeintrags wird bisher nicht erreicht. Dadurch kommt es zu sogenannten Boil-off-Effekten und es muss stets Wasserstoff aus den Tanks entnommen (und möglichst sinnvoll verwendet) werden, um einer Überdrucksituation vorzubeugen. Ohne diese Sicherheitsmaßnahme kommt es zu einer unkontrollierten Wasserstofffreisetzung.

Zum Transport des Wasserstoffs von der Erzeugungsanlage zum Anwender (Industriebetrieb, Tankstelle etc.) können direkte Rohrverbindungen (Pipeline) verlegt werden oder es erfolgt eine Abfüllung in ein Speicherfahrzeug (Trailer), das dann über die Straße, die Schiene oder zu Wasser transportiert wird. Ein wirtschaftliches Optimum wird sich in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Erzeugungs- und Nutzungsort bzw. der Nachfragemenge einstellen. Bei einer kontinuierlichen und entsprechend hohen Nachfrage eignet sich der Rohrleitungstransport. Für die Verteilung in Trailern spricht die größere Flexibilität (individuelle Mengen- und Orts-Anpassung). Zudem kann die Verdichtung an einem zentralen Ort stattfinden, bei der Pipeline müsste an jeder angeschlossenen Tankstelle eine Hochdruckanlage vorgesehen werden.

Aktuell noch in Forschung und Entwicklung befindliche Methoden sind Adsorptions- und Absorptionsspeicher. Wasserstoff wird in einer Hydrierungsphase an einen flüssigen (*Liquid Organic Hydrogen Carrier* – LOHC) oder festen Trägerstoff (z. B. Metallhydrid) gebunden. Hierdurch werden relativ große Speicherkapazitäten und vergleichsweise einfache und sichere Transportmedien geschaffen. Nachteilig ist die Austreibung des Wasserstoffs, da hierfür zusätzlich Energie erforderlich ist und der Trägerstoff zyklisiert, also wieder zur Produktionsanlage zurückgeführt werden muss.

Eine Analyse von Patentanmeldungen konnte für dieses Modul nicht durchgeführt werden, da für die betrachteten Technologien keine trennscharfe Eingrenzung geeigneter Suchbegriffe möglich war.

Quellen:

- Wolfgang Arlt: *Machbarkeitsstudie Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr*. Erlangen, Juli 2017
 Klaas Kunz, Oliver Kircher: *Cryo-Compressed Hydrogen Storage*. Oxford, September 2012
 Andreas Otto und Marc Hubert: *HERA Hydrogen Storage Systems – Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden*, 2002
 Stolzenburg et al.: *Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem*. Berlin, März 2014
 Joachim Wolf: *Die neuen Entwicklungen der Technik – Elemente der Wasserstoff-Infrastruktur von der Herstellung bis zum Tank*. München, 2003
 Robinius et al.: *Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles*. Jülich, 2018

1.2.15 Synthetische Kraftstoffe – Syntheseverfahren

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 ein kohlenwasserstoffhaltiger Energieträger erzeugt.

Die Roadmap zum Modul „Synthetische Kraftstoffe – Syntheseverfahren“ umfasst die vier zentralen Technologietrends „Methanolsynthese (Benzinadditiv)“, „Methansynthese (Austausch für Erdgas)“, „Fischer-Tropsch-Synthese (FT; flüssige Kraftstoffe)“ und „Dimethylether (DME)/Oxymethylether (OME) (Dieseladditiv)“. Im Vordergrund stehen in den nächsten fünf Jahren weitere technologische Entwicklungen oder vor allem Veränderungen bei den Herstellungsverfahren bzw. der systemischen Einbindung ins Gesamtenergiesystem.

Vorteile synthetischer Kraftstoffe gegenüber der batterieelektrischen und der Wasserstoffmobilität sind die hohe Energiedichte der Kraftstoffe und die Nutzung bereits bestehender Infrastruktur (Distribution, [Bestands-]Fahrzeuge). So bestehen heute Speicherkapazitäten von rund 200 TWh im Erdgasnetz und 120 TWh in der Erdölbevorratung, was ein Vielfaches der Speicherkapazität im Stromsystem von 0,4 TWh darstellt und eine saisonale Entkopplung von Energieerzeugung und -nutzung ermöglicht.

Nachteilig wirkt sich auf die synthetischen Energieträger die direkte Umwandlungseffizienz aus. Sowohl bei der Herstellung der Kraftstoffe als auch bei deren Nutzung im Fahrzeug wird nur ein Teil der zuvor eingesetzten Energie zum Vortrieb genutzt. Eine direkte Stromnutzung oder der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzelle bieten hier Vorteile. Dennoch muss bedacht werden, dass der heutige Fahrzeugpark (Deutschland rund 50 Mio. Fahrzeuge, weltweit über 1 Mrd. Fahrzeuge) auch in den kommenden Jahren, wenn nicht Jahrzehnten bestehen und betrieben werden wird. Daher sind auch Lösungen für Bestandsfahrzeuge aus systemischer Sicht dringend nötig. Zudem gibt es heute und zukünftig Anwendungsfelder, für die die direkte Stromnutzung nur eingeschränkt möglich ist.

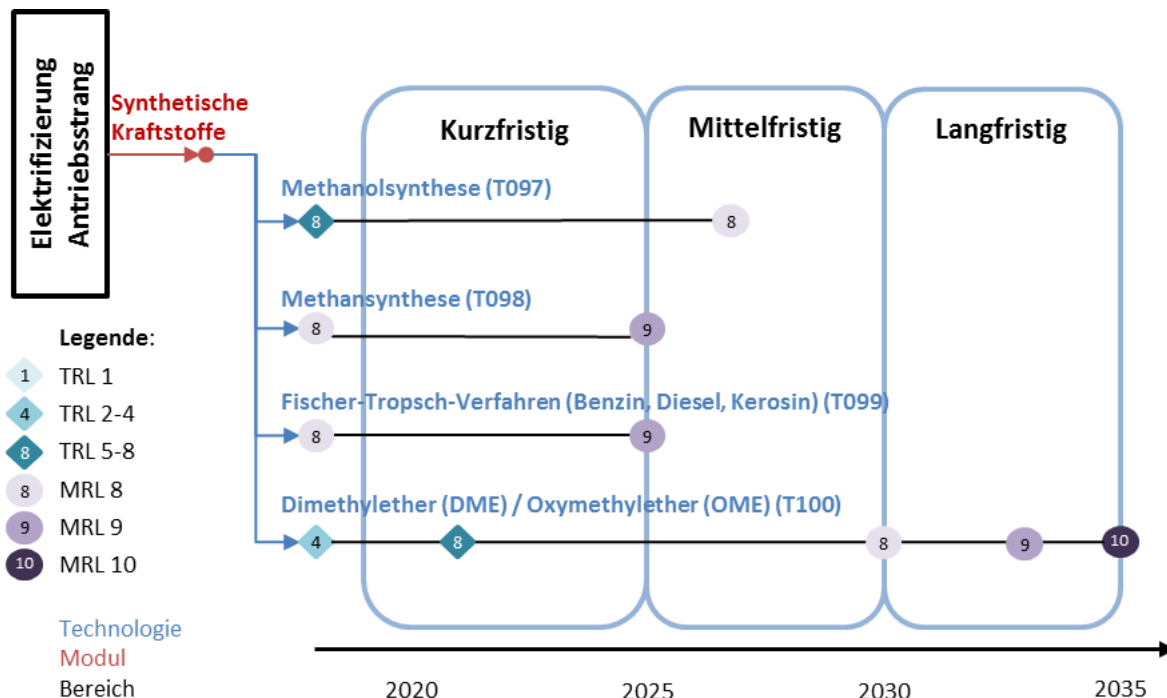


Abbildung 52: Roadmap „Synthetische Kraftstoffe – Syntheseverfahren“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Zur Überwindung langer Strecken (Schwerlastverkehr, Schiffsverkehr und Luftfahrt) werden voraussichtlich auch zukünftig Energieträger mit hoher volumetrischer Energiedichte benötigt (1 l Benzin/Diesel enthält etwa 10–12 kWh, 1 l Wasserstoff etwa 3 Wh, 1 l Li-Ionen-Batterie etwa 330 Wh). Daher wird erwartet, dass weltweit ein signifikanter Bedarf an synthetischen Kraftstoffen entstehen wird, zunächst für die Treibhausgasminimierung bei Bestandsfahrzeugen, anschließend im Last- und Luftverkehr und auch als saisonaler Speicher für erneuerbare Energien, um signifikante Energiemengen über Wochen und Monate speichern zu können (Überbrückung Dunkelflaute etc.).

Die Syntheseverfahren sind in ihrer Entwicklung unterschiedlich weit. Zum Teil bestehen bereits seit Jahrzehnten Anlagen zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe, allerdings wird dabei als Substrat meist ein fossiler Energieträger (Kohle, Erdgas o. Ä.) eingesetzt, um andere flüssige Kohlenwasserstoffe zu erzeugen. Die Hydrierung von CO₂ steht hingegen noch am Beginn der Industrialisierung. Erste Verfahren sind technisch erprobt und im vorindustriellen Maßstab realisiert. Als nächster Schritt muss die Automatisierung im Herstellungsprozess (Anlagenbau) und damit ein Upscaling der Technologien realisiert werden. Dadurch werden weitere Senkungen der Investitionskosten erwartet. Wichtig ist auch die Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen. In der Energiewirtschaft sind heute nur drei Bausteine verankert: Erzeugung, Transport und Verbrauch. Speicher werden daher anteilig der Erzeugung und dem Verbrauch zugeordnet, weswegen jedoch systemstützende Eigenschaften von Speichern gar nicht oder nur wenig honoriert werden. Auch die Sektorkopplung, also die Verbindung unterschiedlicher Energiesektoren, ist bisher nicht ausreichend geregelt.

Zur Identifikation von F&E-Aktivitäten im Bereich „Synthetische Kraftstoffe – Syntheseverfahren“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und insgesamt 1.658 Patente identifiziert. Hiernach ist BASF als einziges deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Institutionen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an. Neben einem US-amerikanischen und einem südkoreanischen Zulieferer ist auch ein chinesisches Unternehmen in der Bestenliste vertreten. Mit Mercedes-Benz, Bosch und BMW investieren nur drei weitere deutsche Unternehmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

**Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:**



Synthetische Kraftstoffe – Syntheseverfahren

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 1.658

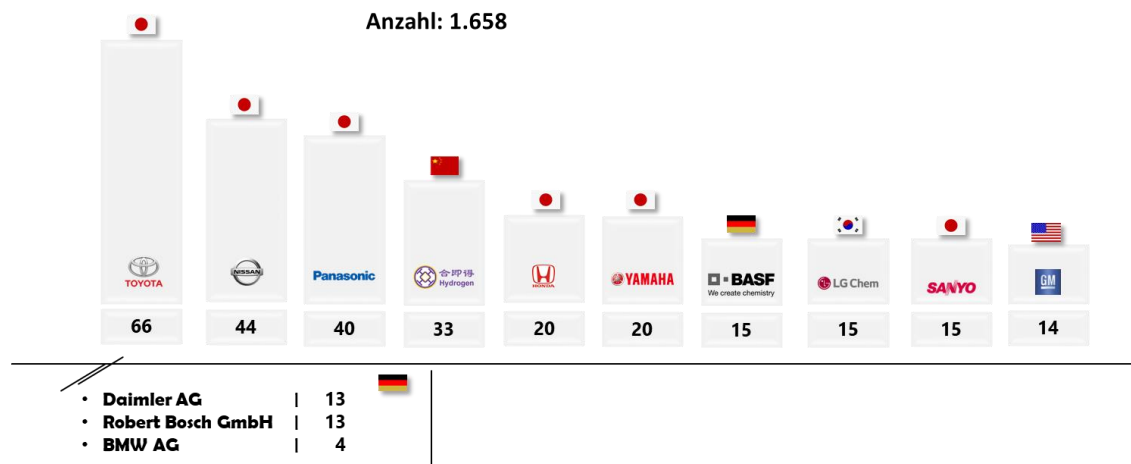


Abbildung 53: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Synthetische Kraftstoffe – Syntheseverfahren“ 2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

2 Automatisiertes und vernetztes Fahren (CAD)

Neben der Elektrifizierung sind aktuell die Automatisierung des Fahrens und die Vernetzung von Fahrzeugen weitere wesentliche Entwicklungstrends (*Connected and Automated Driving* – CAD). Die Automatisierung von Fahrfunktionen beschreibt die stufenweise Übernahme von Funktionen des*der Fahrer*in durch die Maschine bzw. das Fahrzeug selbst. Nach einer gängigen Einteilung der *Society of Automotive Engineers International* (SAE) in der Norm SAE J3016 werden sechs Automatisierungsstufen unterschieden: Während im SAE-Level 0 alle relevanten Fahrfunktionen durch den*die Fahrer*in manuell durchgeführt werden müssen, fährt das Fahrzeug in SAE-Level 5 in allen Situationen autonom, d. h., es ist kein Mensch mehr in das Fahrgeschehen involviert. Tabelle 1 beschreibt die Klassifizierung einzelner SAE-Level.

Tabelle 1: Einteilung der Automatisierungsstufen nach der Norm SAE J3016

SAE Level	Name	Quer- und Längsführung	Umfelderfassung	Rückfallebene	Bemerkung
0	keine Automation	Fahrer*in	Fahrer*in	keine	ABS und ESP können vorhanden sein
1	Assistenzsysteme	Fahrer*in und Fahrzeug	Fahrer*in	Fahrer*in	Unterstützung bei Längs- oder Querverführung
2	Teilautomatisierung	Fahrzeug	Fahrer*in	Fahrer*in	Unterstützung durch Längs- und gleichzeitige Querverführung
3	bedingte Automatisierung	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrer*in	Fahrer*in 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

Die Automatisierung hat dabei verschiedene Ziele. Durch die *Vision Zero Accidents* wird in vielen Unternehmen und Behörden das Ziel beschrieben, weniger Unfälle und insbesondere weniger Unfalldtote zu erreichen. Autonome Fahrzeuge können dazu einen Beitrag leisten. Weitere Nutzen sind ein erhöhter Komfort (bspw. kein Stress in Stausituationen) und eine bessere Nutzung der (Fahr-)Zeiten für die Fahrenden, d. h., statt zu fahren, können andere Handlungen wie beispielsweise mobile Arbeit oder Entertainment vorgenommen werden.

Ein automatisiertes Fahrzeug ab SAE-Level 2 umfasst in der Regel folgende drei Kernkomponenten: Sensoren, Aktuatoren und Recheneinheiten. Die Sensoren erfassen die Umgebung, sind sozusagen die Sinne des Fahrzeugs. 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. Im Ergebnis werden Fahrhinweise in Form von Trajektorien an die Aktuatoren übermittelt, die diese in physische Vorgänge umsetzen. Neben den Sensoren am Fahrzeug – Kamera, LiDAR, Radar und Ultraschall – erfassen weitere Technologien wichtige Informationen für die Berechnung. Durch Fahrzeugkommunikation, d. h. die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander bzw. mit der Infrastruktur oder einer Datencloud, werden Informationen eingespielt, die durch die Sensorik nicht erfasst werden können. Zum Beispiel warnt die Infrastruktur vor einer Gefahrensituation hinter einer Kurve oder ein vorausfahrendes Fahrzeug meldet Glatteis an die nachkommenden Fahrzeuge. Navigationsda-

ten aus der Inertialsensorik sowie der Trilateration mit Satelliten liefern weitere unentbehrliche Informationen.

Neben der aktuell vorwiegend verfolgten fahrzeugbasierten Automatisierung kann die Automatisierung theoretisch auch in die Infrastruktur verlagert werden. Dabei werden die Komponenten im Fahrzeug (Sensoren und Recheneinheiten) reduziert und in die Infrastruktur ausgelagert. Die Infrastruktursensoren erfassen dabei konstant die Umgebung sowie die Fahrzeuge. Eine zentrale Recheneinheit berechnet anschließend für jedes Fahrzeug die Trajektorie und übermittelt diese. Im Extremfall ist das Fahrzeug nur noch ein Aktuator, wenngleich dies unwahrscheinlich ist, weil für Notfälle eine Sicherheitsebene im Fahrzeug verbleiben muss. Die Herausforderungen dieses Ansatzes liegen in der Gewährleistung einer konstant zuverlässigen Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur mit geringer Latenz sowie dem Ausbau der Infrastruktur. Daher wird dieses Konzept vermutlich zunächst in Städten implementiert. Vorteile dieses Ansatzes sind zum einen die reduzierten Kosten: Bei der Ausstattung der Infrastruktur fallen zunächst hohe Kosten an. Da pro Fahrzeug aber weniger Kosten auf die Automatisierung entfallen, wird ab einer bestimmten Fahrzeuganzahl ein Breakeven erreicht. Damit würde die Automatisierung über die Infrastruktur bei einem hohen Durchdringungsgrad billiger als die fahrzeugseitige Automatisierung. Durch die zentrale Steuerung der Trajektorienplanung kann der Verkehrsfluss in den Städten zudem deutlich besser gesteuert werden.

Im Rahmen des Technologiekalenders wird vorerst nur die fahrzeugbasierte Automatisierung und Vernetzung betrachtet. Der infrastruktureitige Ansatz muss gesondert betrachtet werden, ebenso ist der Software-Bereich nicht Teil der Ergebnisse.

In dem Bereich des vernetzten und automatisierten Fahrens werden die folgenden Bereiche bzw. Module betrachtet, die sich im Einzelnen wiederum in Module aufgliedern. Auf der untersten Ebene werden die Modul-Roadmaps mit den einzelnen Technologien erstellt. „Mikrosystemtechnik“ stellt als Exkurs *Enabler*-Technologien vor. Diesem Bereich werden in diesem Kontext keine Submodule zugeordnet.

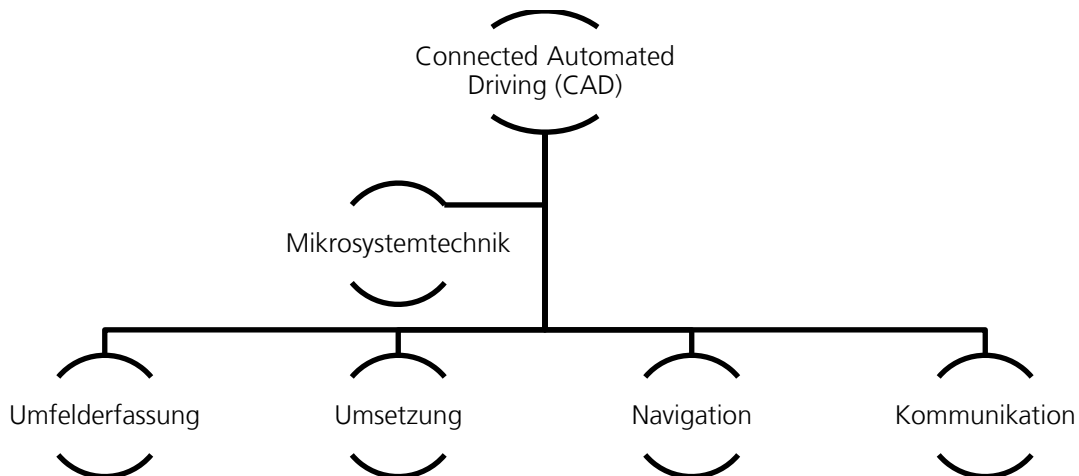


Abbildung 54: Bereiche bei *Connected Automated Driving (CAD)* (Quelle: eigene Darstellung)

2.1 CAD – Umfelderkennung

Für die Erfassung des Fahrzeugumfelds sind verschiedene Sensoren zuständig. Das ist notwendig, weil erst die Kombination unterschiedlicher Sensoren eine umfassende Abbildung der Umgebung ermöglicht. Damit ist dann jedoch eine umfassendere Wahrnehmung als die von Fahrer*innen erreichbar. Grundsätzlich werden derzeit in Fahrzeugen Kameras (u. a. Mono-, Stereo-, Infrarotkamera), LiDAR-Systeme (Fern- und Nahbereich, scannende vs. nicht scannende Systeme), Radarsensoren im Nah- und Fernbereich sowie Ultraschallwandler im Nahbereich eingesetzt.

Da alle Sensoren Stärken und Schwächen haben, liegt die Herausforderung in ihrer sinnvollen Kombination. So können die Stärken der eingesetzten Technologien bestmöglich genutzt werden. Dennoch existieren Grenzen der Erfassung, einerseits durch Störungen aus Wettergeschehnissen, wie Starkregen, Schneefall oder dichtem Nebel, und andererseits durch Verschmutzungen oder Ablagerungen an Fahrzeug und Sensorik. Auf sichtbarem Licht basierende Sensoren bedürfen ausreichender Ausleuchtung der Umgebung. Des Weiteren können entgegenkommende Fahrzeuge bei dichtem Verkehr die Zuverlässigkeit der Signale durch Interferenzen beeinträchtigen.¹

Der Einsatz von LiDAR-Sensoren wird kontrovers diskutiert, da sie in ihrem heutigen Entwicklungsstand vergleichsweise teuer und groß sind. Beispielsweise will Tesla, als einer der wenigen prominenten Fahrzeughersteller, vollständig auf LiDAR-Systeme verzichten und stattdessen die Objektdetektion anhand von Videobildern verbessern.

Während Radarsensoren eine zuverlässige und konstant gute Erfassung erlauben, können LiDAR-Systeme dank einer höheren Trennschärfe Objekte besser unterscheiden und klassifizieren. Bei schlechten Wettereigenschaften reduziert sich aber deren Performanz. Abbildung 55 vergleicht die Stärken und Schwächen verschiedener Sensortypen untereinander und mit der menschlichen Wahrnehmung.

	Mensch	Radar	LiDAR	Kamera	Ultraschall
Objekterkennung	Hohe Leistungsfähigkeit	Fähig, aber schlechtere Leistung	Fähig, aber schlechtere Leistung	Fähig, aber schlechtere Leistung	Fähig, aber schlechtere Leistung
Objektklassifizierung	Hohe Leistungsfähigkeit	Unvermögen	Fähig, aber schlechtere Leistung	Fähig, aber schlechtere Leistung	Unvermögen
Entfernungsbestimmung	Fähig, aber schlechtere Leistung	Hohe Leistungsfähigkeit	Hohe Leistungsfähigkeit	Fähig, aber schlechtere Leistung	Hohe Leistungsfähigkeit
Geschwindigkeitsmessung	Unvermögen	Hohe Leistungsfähigkeit	Fähig, aber schlechtere Leistung	Unvermögen	Unvermögen
Objektkantenerkennung	Hohe Leistungsfähigkeit	Unvermögen	Hohe Leistungsfähigkeit	Hohe Leistungsfähigkeit	Hohe Leistungsfähigkeit
Spurerkennung	Hohe Leistungsfähigkeit	Unvermögen	Unvermögen	Hohe Leistungsfähigkeit	Unvermögen
Reichweite	Hohe Leistungsfähigkeit	Hohe Leistungsfähigkeit	Fähig, aber schlechtere Leistung	Fähig, aber schlechtere Leistung	Unvermögen
Leistung bei schlechtem Wetter	Fähig, aber schlechtere Leistung	Hohe Leistungsfähigkeit	Fähig, aber schlechtere Leistung	Unvermögen	Hohe Leistungsfähigkeit
Leistung bei Nacht bzw. Dämmerung	Unvermögen	Hohe Leistungsfähigkeit	Hohe Leistungsfähigkeit	Fähig, aber schlechtere Leistung	Hohe Leistungsfähigkeit

Legende: Hohe Leistungsfähigkeit Fähig, aber schlechtere Leistung Unvermögen

Abbildung 55: Stärken und Schwächen verschiedener Sensoren (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Cochard 2018 und Schoettle 2017²)

Um für möglichst viele unterschiedliche Situationen und Wetterverhältnisse vorbereitet zu sein, ist eine Kombination unerlässlich. Außerdem gewährleistet das eine Redundanz und damit die Sicherheit der Systeme. Nach der Erfassung der Umgebung werden die Daten gesammelt und gemeinsam zu einem Gesamtbild ausgewertet.

Vor allem Videokameras und LiDAR-Sensoren liefern eine große Menge an Daten, die weitreichende Anforderungen an die Datenübertragung und an die Recheneinheit bei der Auswertung stellt. Zukünftig könnten fortschreitende Verbesserungen in der künstlichen Intelligenz die Auswertung intelligenter und damit effizienter gestalten oder sogar einzelne Sensoren überflüssig machen.

Der Bereich „CAD – Umfelderkennung“ umfasst die folgenden Module:

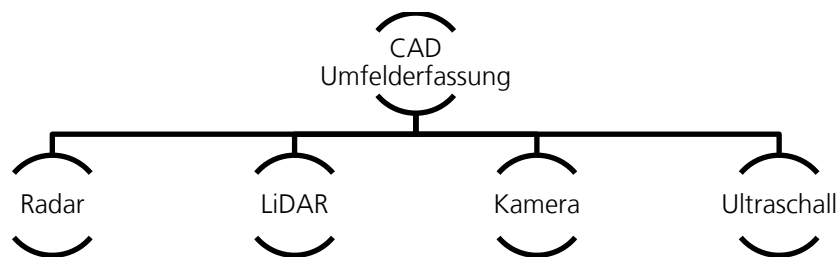


Abbildung 56: Module im Bereich „CAD – Umfelderkennung“ (Quelle: eigene Darstellung)

¹ Yole Développement: Imaging for Automotive 2019, 2019, https://yole-i-micronews-com.osu.eu-west-2.outscale.com/uploads/2019/06/YD19026_Imaging-for-automotive-2019_sample.pdf; Jacques Cochard et al.: LiDAR Technologies for the Automotive Industry (Tematys, Juni 2018), <https://www.swissphotonics.net/libraries.files/Cochard.pdf>; Brandon Schoettle: Sensor Fusion: A Comparison of Sensing Capabilities of Human Drivers and Highly Automated Vehicles, August 2017, <http://umich.edu/~umtristwt/PDF/SWT-2017-12.pdf>.

² Cochard et al.: LiDAR Technologies for the Automotive Industry; Schoettle: Sensor Fusion: A Comparison of Sensing Capabilities of Human Drivers and Highly Automated Vehicles.

2.1.1 Radar

Ein zentraler Sensor für die erfolgreiche Umsetzung automatisierten bzw. autonomen Fahrens ist der Radar (*Radio detection and ranging*). Dabei werden elektromagnetische Wellen im Radiofrequenzbereich ausgesendet und deren Reflexion an Objekten in der Umgebung (das Echo) wieder erfasst. Daher werden Radar-Sensoren ebenso wie LiDAR- oder Ultraschall-Sensoren den aktiv messenden Systemen zugeordnet. Das erste Radarsystem in einem Fahrzeug wurde 1998 für die Funktion der adaptiven Geschwindigkeitsregelung eingeführt.¹ Inzwischen ist die Radartechnologie gemeinsam mit der Kameratechnologie der zentrale Bestandteil für Assistenzsysteme.

Radarsysteme bestehen grundsätzlich aus einem Sender, der hochfrequente Schwingungen erzeugt, einer Antenne, welche die elektromagnetischen Wellen aussendet und das Echo wieder aufnimmt, und einem Empfänger, der die Echosignale von störendem Umgebungsruschen trennt und in ein digitales Signal umwandelt. Dadurch können Abstand, Geschwindigkeit und Richtung von Umgebungsobjekten ermittelt werden.

Die Roadmap zum Modul „Radar“ umfasst die Technologietrends „Miniaturisierung“, „Sensorfusion“, „OFDM RadCom“, „79-GHz-Radar“ und „Radar im niedrigen THz-Bereich“. Die Technologien „Sensorfusion“ und „79-GHz-Radar“ sind weit entwickelt, zukünftig werden kurzfristig vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet. Die anderen Technologien werden die Produktionsreifegrade voraussichtlich erst mittel- bis langfristig erreichen.

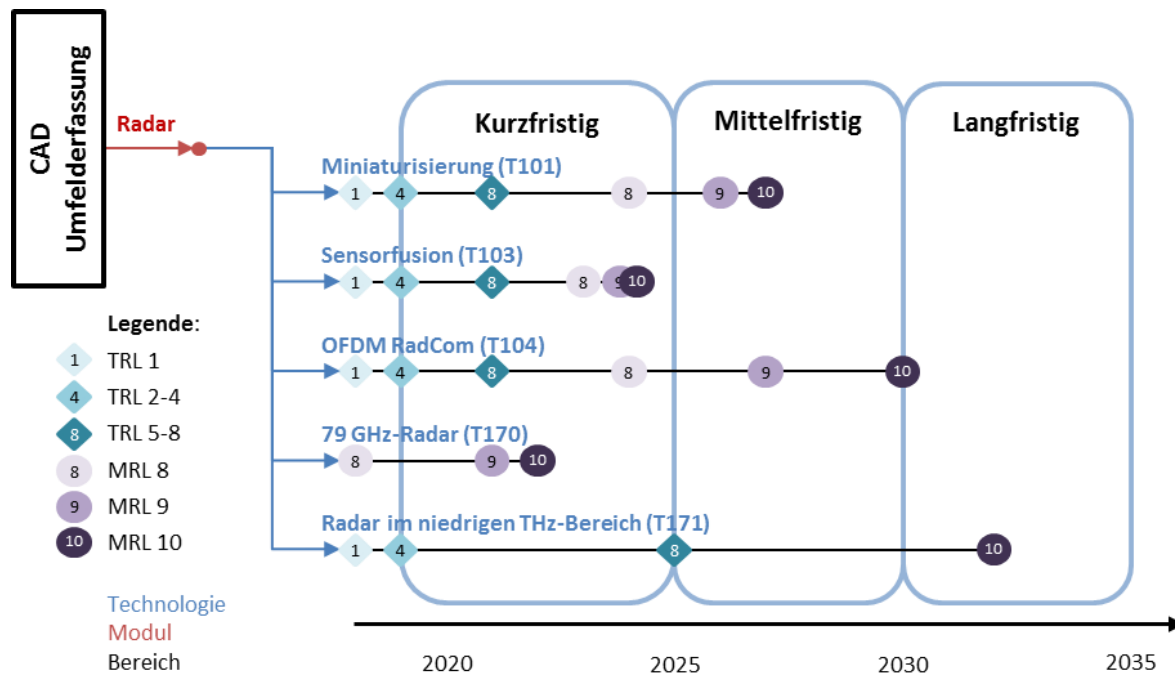


Abbildung 57: Roadmap „Radar“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Eine Klassifizierung unterschiedlicher Radarsensoren erfolgt vorwiegend anhand der Frequenzbereiche, in denen sie operieren: Zu Beginn der automobilen Radarentwicklung wurde am 10-GHz-Bereich geforscht, heute am Markt verfügbare Radarsysteme operieren im Bereich von 24 GHz (Schmalband: 24,0–24,25 GHz oder Breitband bzw. UWB: 21,65–26,65 GHz) oder 77 GHz (76–77 GHz).² Der 24-GHz-UWB-Frequenzbereich wird allerdings ab 2022 in den USA und Europa verboten. Für die zukünftige Entwicklung zeichnen sich eine weitere Steigerung der Frequenzen sowie breitere Frequenzbänder ab (siehe Roadmap). Allerdings können die Systeme auch nach der Wellenform unterschieden werden: Die einen Systeme senden gepulste Wellen aus, während andere eine kontinuierliche Welle aussenden. Für die Messung von Abstand und Geschwindigkeit müssen die Wellen moduliert werden.

Anhand der Größen Amplitude, Frequenz und Phase kann die Welle derart „gekennzeichnet“ werden, dass sie als Echo mit dem Ausgangssignal verglichen werden kann. Bei einem Puls wird ein kurzer Wellenzug gebildet und dessen Laufzeit für die Entfernungsbestimmung gemessen. Die Frequenzänderung liefert gemäß Doppler-Effekt die Relativgeschwindigkeit des Objekts. Bei den heutigen Radarsystemen überwiegt allerdings der Einsatz der Dauerstrich-Frequenzmodulation (FMCW, *Frequency Modulated Continuous Wave*), weil dieses Verfahren bessere Eigenschaften hinsichtlich des Stromverbrauchs und der Entfernungsauflösung besitzt. Dabei wird die Frequenz des Signals kontinuierlich verändert. Das Frequenzmuster des Echos wird mit dem Referenzsignal verglichen und ermöglicht Informationen über Abstand und Geschwindigkeit.³

Die Bestimmung der Richtung erfolgt entweder über mechanisches Drehen der Antennen oder durch elektronisches Schwenken des Strahls. Werden zwei Sensoren verwendet, dann kann durch Überlagerung der Signale zusätzlich der Winkel bestimmt werden, in dem das Objekt zum Fahrzeug steht.

Bemerkenswerte Vorteile von Radarsystemen gegenüber optisch basierten Sensoren, wie LiDAR und Kamera, ist deren hohe Leistungsfähigkeit unter schlechten Wetterbedingungen, starker Sonneneinstrahlung, die sehr hohe Reichweite, die Möglichkeit, hinter elektromagnetisch durchlässigen Materialien platziert zu werden, und das Vermögen, sogar von anderen Gegenständen verdeckte Objekte zu erkennen. Außerdem ist die Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung sehr präzise und der Sensor arbeitet genauso gut bei Tag wie bei Nacht. Vor allem metallische Objekte werden äußerst zuverlässig detektiert. Diese Stärken etablierten den Radar schnell als zentralen Sensor für verschiedene Assistenzsysteme, wie beispielsweise den Totwinkelassistent, die adaptive Geschwindigkeitsregelung, die Kollisionswarnung oder den Notbremsassistent.⁴

Bei Funktionen, die eine sehr hohe Auflösung oder Farbsehen erfordern, zeigt die Radar-Technologie Schwächen. Beispielsweise ist im Vergleich zu LiDAR Systemen die Trennschärfe deutlich schlechter. Auch eine Klassifizierung von Objekten ist mit Radar nicht direkt möglich, d. h., das System erkennt nur, dass ein Objekt vorhanden ist, kann aber verschiedene Objekte nicht auseinanderhalten. Spurhalteassistenten, Ampelassistenten oder Straßenschildererkennung benötigen Farbsehen bzw. sehr gute Kontrasteigenschaften – auch hierfür ist Radar ungeeignet. Mit Systemen im niedrigen THz-Bereich wird aber an einer Radartechnologie geforscht, die eine hohe Trennschärfe ebenso wie gute Kontrasteigenschaften liefern kann (siehe Roadmap). Damit könnten sich in Zukunft weitere Anwendungsfelder für Radarsysteme eröffnen.

Typischerweise werden Radarsysteme in drei Anwendungsklassen anhand ihrer Reichweite eingeteilt: Nahbereich (*Short-Range Radar*, SRR), mittlerer Bereich (*Mid-Range Radar*, MRR) und Ferndistanz (*Long-Range Radar*, LRR). SRR operieren von ca. 0,5 m bis ca. 30 m, haben einen breiten Öffnungswinkel von bis zu 90° (idealerweise 120°) und eine gute (Winkel-)Auflösung von ca. 0,5° (basierend auf einer breiten Frequenzbandbreite). Radarsysteme für die Ferndistanz haben einen kleineren Öffnungswinkel (ca. 15–20°) und eine geringere Auf-

lösung, aber dafür eine Reichweite von bis zu 250 m.⁵ Zusammenfassend sind wichtige Kenngrößen für Radarsensoren: Entfernungsbereich und -auflösung, Öffnungswinkel, Winkelauflösung, Relativgeschwindigkeitsbereich und -auflösung, Größe, Kosten und Stromverbrauch.

Bei der Analyse von Patentanmeldungen sind Bosch und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt. Eine weitere chinesische Forschungseinrichtung und ein südkoreanischer OEM vervollständigen die Darstellung. Insgesamt sind weitere fünf deutsche Firmen in der Technologieentwicklung und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

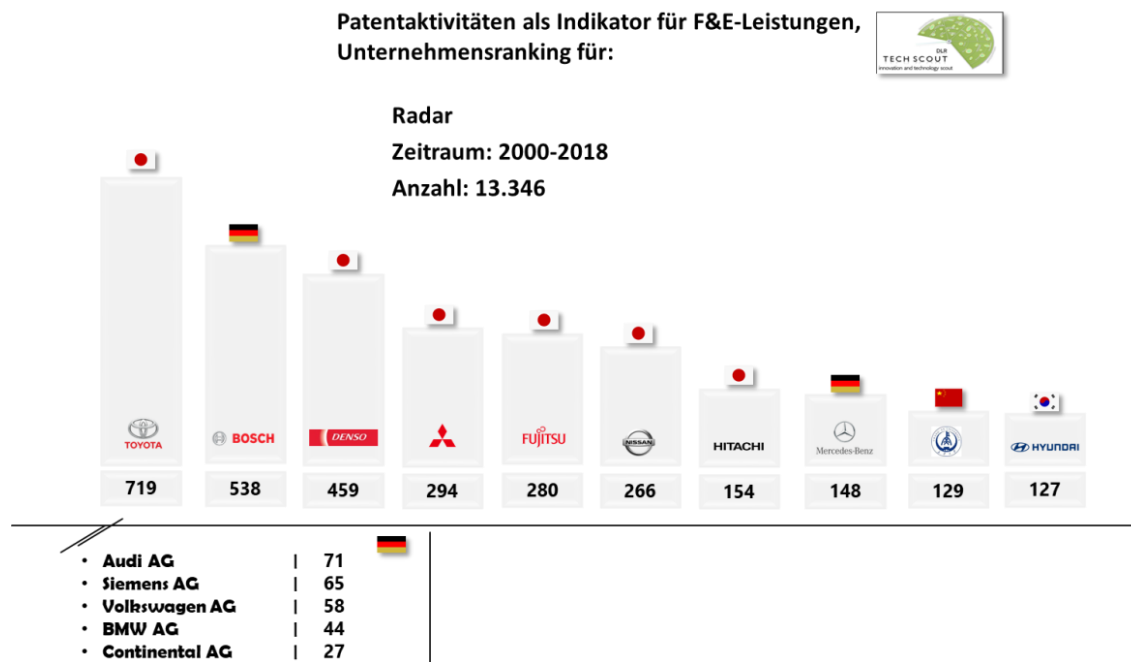


Abbildung 58: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Radar“ 2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

¹ Hermann Winner, Hrsg., *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*; mit 45 Tabellen, 2., korrigierte Aufl, Praxis ATZ/MTZ-Fachbuch (Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012).

² Winner; Citigroup, „CAR OF THE FUTURE v4.0“, Januar 2019; F. Norouzian u. a., „Next Generation, Low-THz Automotive Radar – the potential for frequencies above 100 GHz“, in *2019 20th International Radar Symposium (IRS)* (2019 20th International Radar Symposium (IRS), Ulm, Germany: IEEE, 2019), 1–7, <https://doi.org/10.23919/IRS.2019.8767461>.

³ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Vipul Jain und Payam Heydari, „Radar Fundamentals“, in *Automotive Radar Sensors in Silicon Technologies*, von Vipul Jain und Payam Heydari (New York, NY: Springer New York, 2013), 5–11, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6775-6_2; Citigroup, „CAR OF THE FUTURE v4.0“; Karthik Ramasubramanian, Kishore Ramaiah, und Artem Aginskiy, „Moving from legacy 24 GHz to state-of-the-art 77 GHz radar“ (Texas Instruments, Oktober 2017), <http://www.ti.com/lit/wp/spr312/spr312.pdf>.

⁴ Citigroup, „CAR OF THE FUTURE v4.0“; Yole Développement, „Sensors and Data Management for Autonomous Vehicles“, Oktober 2015, https://yole-i-micronews-com.osu.eu-west-2.outscale.com/uploads/2019/03/Yole_Sensors_and_Data_Management_for_Autonomous_Vehicles_October_2015_Sample.pdf; Fabian de Ponte Müller, „Cooperative Relative Positioning for Vehicular Environments“ (PhD Thesis, Universität Passau, 2018), <https://opus4.kobv.de/opus4-uni-passau/frontdoor/index/index/docId/541>.

⁵ Yole Développement, „Sensors and Data Management for Autonomous Vehicles“; Müller, „Cooperative Relative Positioning for Vehicular Environments“; Schoettle, „Sensor Fusion: A Comparison of Sensing Capabilities of Human Drivers and Highly Automated Vehicles“.

2.1.2 LiDAR

Ein LiDAR-System (*Light Detection And Ranging*) erfasst durch optische Messverfahren die Umwelt in einer Punktwolke. Damit ergänzt es das Sensorset für die Wahrnehmung automatisierter Fahrzeuge. Vorteile gegenüber Radar- und Kamera-Systemen sind u. a. eine höhere Reichweite, eine bessere Auflösung und gute Schlechtwettereigenschaften. Ein LiDAR basiert auf einem ähnlichen Prinzip wie Radarsensoren. Statt Mikrowellen wird allerdings Laserlicht zur Laufzeitmessung verwendet.

Im Fahrzeugbereich wird bisher vorwiegend das Time-of-Flight-Messprinzip verwendet. Dabei wird ein Laserpuls ausgesendet und die Zeit gemessen, bis das reflektierte Licht vom Empfänger detektiert wird. Die Entfernung der Objekte in der Umgebung lässt sich dann über die Lichtgeschwindigkeit und den Brechungsindex der Luft berechnen.¹ Zuerst wurde ein LiDAR-System in der Astronomie eingesetzt. Erst mit der Miniaturisierung der Systeme fand LiDAR Einzug in Straßenfahrzeuge.²

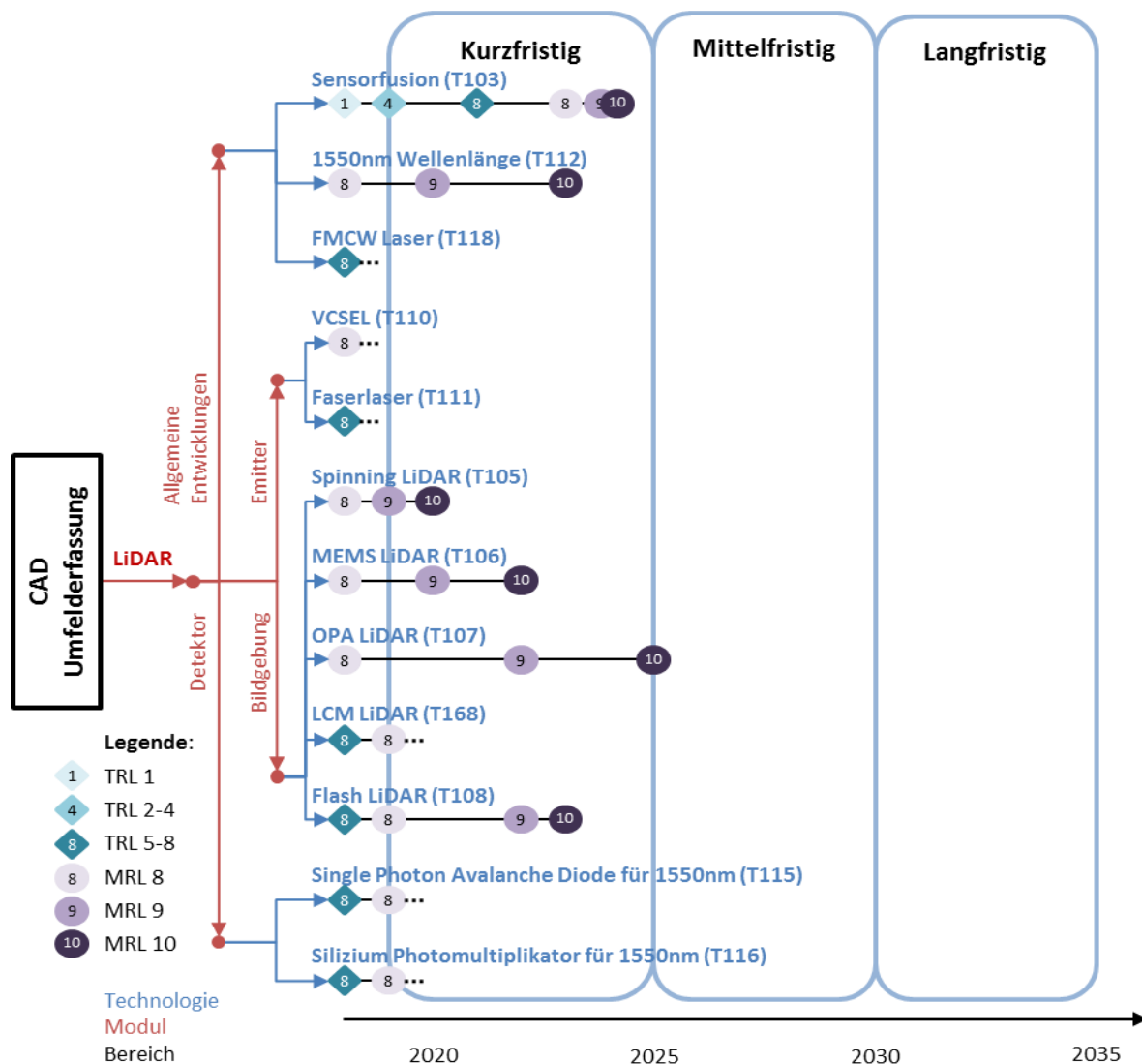


Abbildung 59: Roadmap „Lidar“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Die Roadmap zum Modul „LiDAR“ umfasst die vier Submodule mit jeweils weiteren Technologien. Insgesamt sind die Technologien relativ weit entwickelt, sodass kurzfristig mit MRL 10 zu rechnen ist. Einzelne Technologien wie „OPA LiDAR“ oder der Einsatz der 1550-nm-Wellenlänge benötigen voraussichtlich etwas länger.

Grundsätzlich besteht jedes LiDAR-System aus einem Emitter (Beleuchtung), einem optischen System zur Strahlformung und -steuerung (Bildgebung) sowie einem optoelektronischen Sensor, der die zurückkehrenden Photonen wahrnimmt (Photodetektor).³ Die Roadmap teilt die identifizierten Technologien in eben diese Kategorien ein.

In der Regel wird die Art der Bildgebung als Unterscheidungsmerkmal verschiedener LiDAR-Systeme herangezogen. Grundsätzlich wird zwischen scannenden Systemen und nicht scannenden, sogenannten Staring-Systemen unterschieden. Staring-Systeme erfassen das gesamte Umfeld in einem Augenblick, d. h. durch das einmalige Aussenden von Licht. Der bekannteste Vertreter dieser Kategorie ist der Flash-LiDAR. Die ersten automobilen LiDAR-Systeme beruhten allerdings auf dem Scanning-Prozess. Dabei wird die Umgebung Schritt für Schritt erfasst: entweder über einen Linien-Scan, wobei die Umgebung in mehrere Linien-Segmente unterteilt wird, oder über ein Raster-Scan, bei dem die Umgebung aus einzelnen Punkten zusammengesetzt wird.⁴ Die Scanning-Systeme werden des Weiteren in Lösungen ohne bewegliche Komponenten und solche mit beweglichen Elemente in Form von Makro- oder Mikro-Spiegeln differenziert. Spinning-LiDAR-Systeme sind wohl die bekanntesten Vertreter, da sie beispielsweise als „Hut“ auf den ersten selbstfahrenden Testautos von Google zum Einsatz kamen.⁵

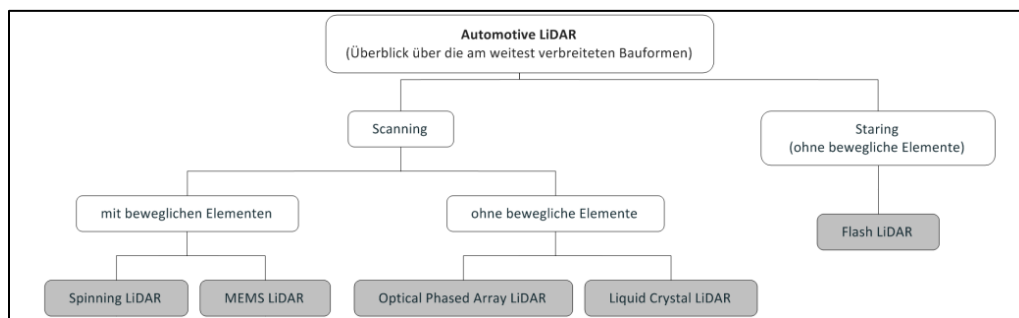


Abbildung 60: Einordnung verschiedener LiDAR-Systeme (Quelle: eigene Darstellung)

Basierend auf dem Funktionsprinzip sind den Systemen einige Vor- und Nachteile inhärent: Raster-Scans haben die höchste Energiedichte pro Pixel und erreichen somit ein sehr gutes reflektiertes Signal und damit eine sehr hohe Reichweite. Allerdings sind die Systeme langsam, da die Umgebung Punkt für Punkt erfasst wird. Flash-Systeme fächern die Ausgangsenergie auf das gesamte Bild auf. Entsprechend gering sind die reflektierte Signalstärke und die Reichweite. Dafür arbeiten sie deutlich schneller. Das Prinzip des Linien-Scans bildet einen Mittelweg (1D, da nur eine Spiegelachse bewegt werden muss).⁶

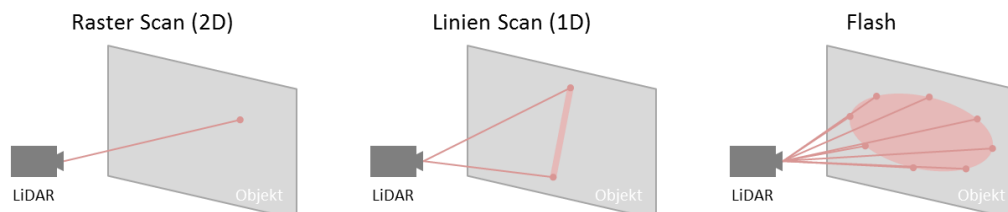


Abbildung 61: Funktionsprinzipien von LiDAR-Systemen (Quelle: eigene Darstellung)

Für den Einsatz in Pkw und leichten Nutzfahrzeugen definieren verschiedene Quellen folgende Anforderungen an ein LiDAR-System.⁷ Allerdings sind diese Angaben von der Betriebsstrategie der OEM abhängig und können dementsprechend variieren:

- *Field of View* (Sichtfeld) $\geq 120^\circ \times 16^\circ$ (horizontal $\times$ vertikal),
- Winkelauflösung $\leq 0,1^\circ \times 0,5^\circ$ (horizontal $\times$ vertikal),
- Reichweite ≥ 200 m (für Fernbereich),
- Scan-Geschwindigkeit ≥ 20 Bilder pro Sekunde,
- Systemkosten ≤ 200 USD,
- Sicherheit: ASIL-C und Laser-Klasse 1 (Augensicherheit),
- Robust gegen Erschütterungen und Vibrationen,
- Systemgröße: je kleiner desto besser,
- Umwelteinflüsse und Reflexionseigenschaften: auch bei schlechtem Wetter, direkter Sonneneinstrahlung und wenigen reflektierenden Objekten funktionstüchtig.

Grundlegend muss aber unterschieden werden, ob das System für die Erfassung des nahen Umfelds (< 50 m) oder als Long-Range-LiDAR eingesetzt werden soll. Entsprechend ändern sich die obigen Spezifikationen. Flash-LiDAR-Systeme sind beispielsweise nur als Short-Range-Systeme einsetzbar, da ihr Funktionsprinzip (Auffächerung des Laserlichts) eine zu hohe Ausgangsleistung erfordern würde, um eine größere Reichweite zu erzielen. Zu den Funktionen, die LiDAR Systeme ermöglichen bzw. unterstützen sollen, zählen Totwinkel-Assistent, Objekt- und Fußgänger-Erkennung, Kollisionserkennung und allgemein das Mapping des Umfelds.⁸

Bei der Analyse von Patentanmeldungen sind Bosch, Mercedes-Benz, Continental und Volkswagen als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Bosch führt das Ranking insgesamt an, gefolgt von drei US-amerikanischen Unternehmen. Auch südkoreanische OEM und Zulieferer können in diesem Bereich identifiziert werden. Insgesamt sind zahlreiche deutsche Unternehmen in der Technologieentwicklung und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

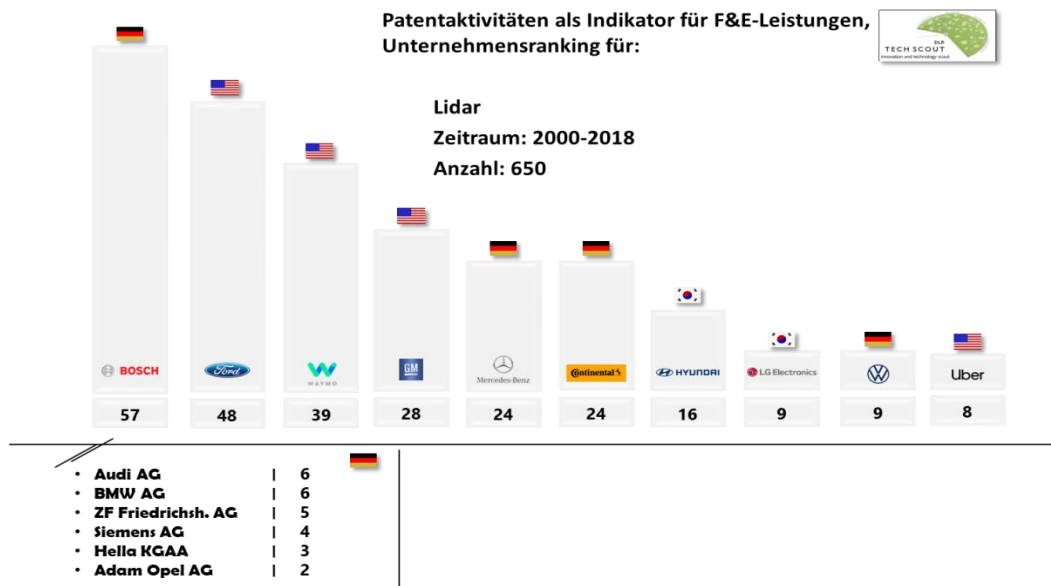


Abbildung 62: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Lidar“ 2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

-
- ¹ Norbert Druml u. a., „1D MEMS Micro-Scanning LiDAR“, in *SENSORDEVICES 2018*, 2018, https://www.thinkmind.org/download.php?articleid=sensordevices_2018_3_30_20065; Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*.
- ² Frost & Sullivan, „LiDAR: Driving the Future of Autonomous Navigation“, 2016.
- ³ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*.
- ⁴ Han Woong Yoo u. a., „MEMS-Based Lidar for Autonomous Driving“, *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik* 135, Nr. 6 (Oktober 2018): 408–15, <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0635-2>; Cochard u. a., „LiDAR Technologies for the Automotive Industry“.
- ⁵ Brian Burkhard u. a., „Technology Scan White Paper“ (Dallas: Jacobs Engineering Group Inc., 9. Mai 2018).
- ⁶ Cochard u. a., „LiDAR Technologies for the Automotive Industry“.
- ⁷ Druml u. a., „1D MEMS Micro-Scanning LiDAR“.
- ⁸ Michael Krail u. a., „Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr“, Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (Karlsruhe, 8. Januar 2019).

2.1.3 Kamera

Kamerasysteme erfassen die Umgebung, indem Bildsensoren elektromagnetische Wellen detektieren, die von Objekten in der Umgebung emittiert bzw. reflektiert werden. Im alltäglichen Sprachgebrauch stehen Kameras für Systeme, die im Bereich sichtbaren Lichts mit elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen von 400 nm bis 750 nm arbeiten. Allerdings kann mit demselben Messprinzip auch Strahlung anderer Wellenlängen aufgenommen werden (beispielsweise Infrarotstrahlung). Die Erfassung anderer Frequenzen bietet mehr Informationen über die Umgebung und wird bei der Entwicklung zukünftig in Fahrzeugen eingesetzter Kameras umgesetzt (siehe Roadmap).¹ Der prinzipielle Aufbau bzw. die grundlegende Abbildungskette von Kamerasystemen ist aber stets ähnlich und in Abbildung 64 dargestellt.

Die Roadmap zum Modul „Kamera“ umfasst sechs zentrale Technologietrends. Dabei ist nur bei einer Technologie MRL 10 vor 2025 zu erwarten. Bei den übrigen Technologien stehen kurzfristig technologische Entwicklungen im Vordergrund, mittel- bis langfristig werden vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet.

Bei den Bildsensoren haben sich die CMOS-Sensoren für den Einsatz im Fahrzeug gegenüber der CCD-Technologie durchgesetzt. Chips mit Fotoelementen der *Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor*-Technologie (CMOS) werden in Masse und kostengünstig in Halbleiterfabriken hergestellt. Jedes Fotoelement ist einzeln adressierbar, d. h., einzelne Pixel können unabhängig voneinander ausgelesen werden. Nachteile der Technologie sind ein vergleichsweise hohes Rauschen und geringe Dynamik aufgrund der dicht gepackten Schaltelemente und der geringen Pixelgröße. Allerdings leisten aktuelle CMOS-Sensoren bereits bis zu 10 Megapixel und haben einen dynamischen Bereich von bis zu 140 dB.² Die Entwicklung geht zu immer leistungstärkeren Sensoren (siehe Roadmap).

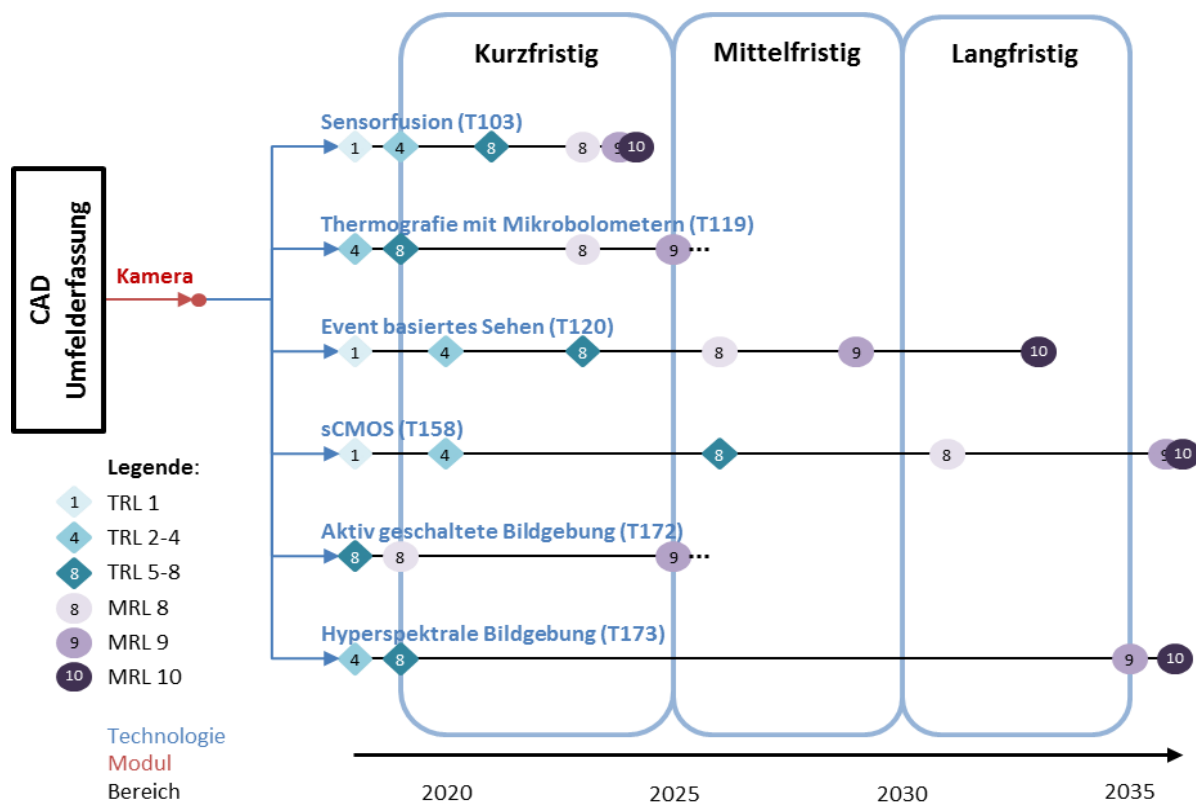


Abbildung 63: Roadmap „Kamera“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Neben der Einteilung anhand der erfassten Spektren hat sich eine Unterscheidung hinsichtlich des Systemaufbaus bzw. der Möglichkeit der Tiefendatenerfassung etabliert: Mono- und Stereokameras. Monokameras sind monokulare Systeme, die nur einen Bildsensor bzw. eine Kamera nutzen. Daneben existieren Stereokameras, die im Grunde aus zwei Monokameras bestehen, und Time-of-Flight-Kameras (ToF). Monokameras sind die wohl bekanntesten Systeme, da gewöhnliche Digitalkameras nach diesem Prinzip und mit einem solchen Aufbau funktionieren: Licht aus der Umgebung wird auf dem Bildsensor abgebildet und in ein zweidimensionales digitales Bild umgewandelt. Diese Systeme sind auf Softwarelösungen (maschinelles Sehen) angewiesen, um anhand von Perspektiven und Kontext (hinterlegtes Wissen bezüglich üblicher Objektgrößen) Informationen über Längenmaße und Tiefendaten zu erhalten. Das Verfahren der Stereokamera beruht auf der Querdissipation und ist der Funktionsweise menschlicher Wahrnehmung sehr ähnlich. Dabei nehmen zwei Kameras dieselbe Szene aus unterschiedlichen Richtungen auf und vergleichen die Bilder. Werden korrespondierende Punkte gefunden, kann deren Entfernung mittels Triangulation bestimmt werden. Die Reichweite beträgt für monokulare Systeme ca. 150 m und für Stereokameras 100 m, während das horizontale *Field of View* bei beiden Systemen bei ca. 45–90° liegt. Bei ToF-Kameras wird Licht (meist Infrarot) emittiert und anschließend die Laufzeit gemessen, bis das an der Umgebung reflektierte Signal detektiert wird. Daraus lässt sich die Entfernung berechnen.³

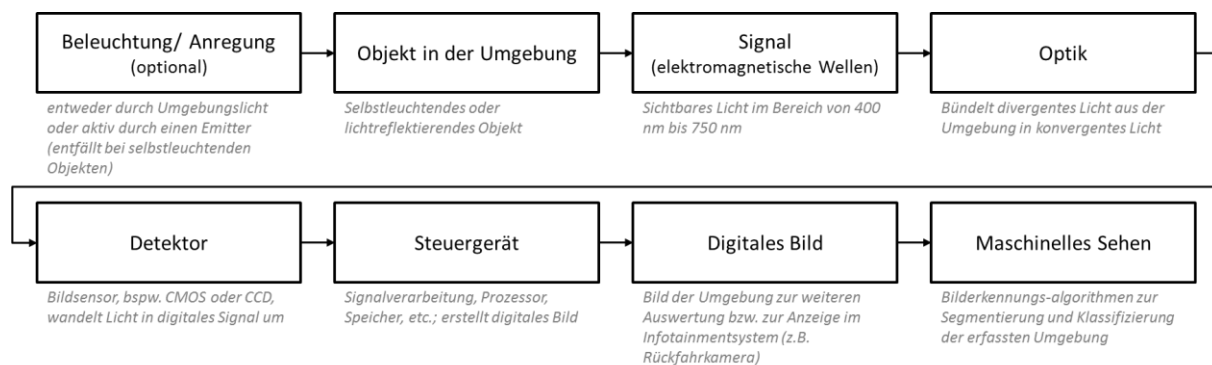


Abbildung 64: Prinzipieller Aufbau von Kamerasystemen (Quelle: eigene Darstellung)

Eine herausragende Stärke von Kamerasystemen gegenüber allen anderen Sensoren ist die Informationsmenge, die erfasst werden kann. Vor allem die Möglichkeit der Farbwahrnehmung ist wichtig für Funktionen wie Spurhalteassistent sowie die Erkennung von Straßenschildern und Ampeln. Der systeminhärente Vorteil der Tiefendatenerfassung von Stereo- und ToF-Kameras gegenüber Monokameras wird mit erheblichen Fortschritten in der Bildverarbeitung weniger relevant. Daher werden Monokameras aufgrund ihrer hohen Auflösung, ihrer geringen Masse und Größe sowie ihrer niedrigen Kosten immer wichtiger in der Automatisierungsstrategie von OEM.⁴

Nachteile von Kamerasystemen sind u. a. die fehlende Möglichkeit zur Messung der Relativgeschwindigkeit und die reduzierte Leistungsfähigkeit bei schlechten Wetterbedingungen (starker Regen, Schnee, direkte Sonneneinstrahlung). Außerdem muss bei dem Design von Kameraoptiken darauf geachtet werden, dass möglichst wenig Abbildungsfehler entstehen, wie beispielsweise Öffnungsfehler, Koma, Astigmatismus, Bildfeldkrümmung, Verzeichnung oder chromatische Aberrationen. Zudem muss eine Abschattung durch Vignettierung vermieden werden. Den Algorithmen zur Bildverarbeitung (bzw. *Machine Vision*, Maschinelles Sehen) fällt neben dem Bildverstehen (Segmentierung und Klassifizierung) und der 3-D-Rekonstruktion von 2-D-Bildern auch die Korrektur dieser Fehler zu. Für die Bildverarbeitung wird allerdings eine mit einem erhöhten Energiebedarf einhergehende sehr hohe Rechenleistung benötigt. Da die Kameras auf ein freies Sichtfeld ange-

wiesen sind, müssen die Sensoren an Stellen platziert werden, die vor Verschmutzungen sicher sind. Als geeigneter Ort hat sich der Platz zwischen Windschutzscheibe und Rückspiegel erwiesen.⁵

Ihre Eigenschaften qualifizieren Kamerasysteme neben dem Einsatz in Spurhalteassistenten (Fahrstreifenerkennung) und Verkehrszeichenassistenten auch für die Erkennung von Fußgängern und dank maschinellem Sehen auch für die Erkennung bzw. Klassifizierung von Objekten.⁶

Neben den in der Roadmap abgebildeten konkreten Entwicklungen werden allgemeine Trends verfolgt, wie die Steigerung des maschinellen Sehens durch verbesserte Algorithmen und künstliche Intelligenz (einschließlich neuronaler Netze). Des Weiteren wird stets an kleineren und kostengünstigeren Geräten mit höherer Auflösung gearbeitet.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich Kamerasysteme wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. In diesem Bereich konnten über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg 3.666 Patente erkannt und für die Analyse herangezogen werden. Hiernach ist nur Bosch als deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Insgesamt dominieren japanische Unternehmen das Ranking nach Patentzahl. Mit Qualcomm ist nur ein weiterer US-amerikanischer Zulieferer in der Rangliste vertreten. Acht weitere deutsche Firmen investieren in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

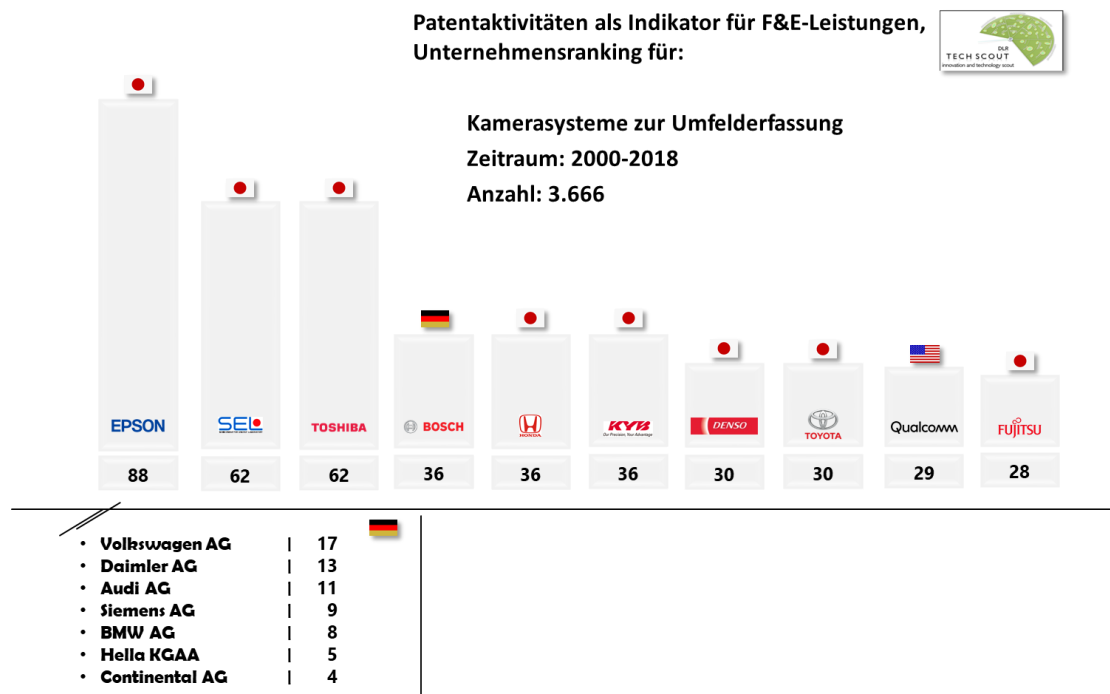


Abbildung 65: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Kamerasysteme zur Umfelderkennung“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

¹ Nicolas Pinchon u. a., „All-Weather Vision for Automotive Safety: Which Spectral Band?“, in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2018*, hg. von Jörg Dubbert, Beate Müller, und Gereon Meyer (Cham: Springer International Publishing, 2019), 3–15, https://doi.org/10.1007/978-3-319-99762-9_1; Yole Développement, „Imaging for Automotive 2019“.

² Citigroup, „CAR OF THE FUTURE v4.0“; Ekkert Hering und Rolf Martin, Hrsg., *Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Grundlagen und Anwendungen: mit zahlreichen Bildern, Tabellen, Beispielen* (München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017).

³ Citigroup, „CAR OF THE FUTURE v4.0“; Müller, „Cooperative Relative Positioning for Vehicular Environments“; Schoettle, „Sensor Fusion: A Comparison of Sensing Capabilities of Human Drivers and Highly Automated Vehicles“; Hering und Martin, *Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*.

⁴ Müller, „Cooperative Relative Positioning for Vehicular Environments“; Schoettle, „Sensor Fusion: A Comparison of Sensing Capabilities of Human Drivers and Highly Automated Vehicles“.

⁵ Citigroup, „CAR OF THE FUTURE v4.0“; Pinchon u. a., „All-Weather Vision for Automotive Safety“; Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Hering und Martin, *Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*.

⁶ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Citigroup, „CAR OF THE FUTURE v4.0“; Müller, „Cooperative Relative Positioning for Vehicular Environments“; Yole Développement, „Imaging for Automotive 2019“.

2.1.4 Ultraschall

Ultraschallsensoren werden bereits seit Langem in verschiedensten Branchen, wie der Medizintechnik oder der Werkstoffprüfung, eingesetzt. Vergleichsweise spät für die Ultraschall-Technologie, aber früh in Bezug auf Fahrassistenzsysteme fanden Ultraschallsensoren ab den 1990er Jahren auch Einzug in das Automobil. Seither werden sie vor allem als Einparkhilfen verwendet, inzwischen von einigen Herstellern aber auch für die Funktion des Totwinkelassistenten eingesetzt.¹ Ein neues Anwendungsfeld für Ultraschallsensoren könnte in Zukunft im Enter- bzw. Infotainment-Bereich des Fahrzeugs entstehen, d. h. an der Schnittstelle zwischen Maschine und Fahrer*in. Durch Ultraschall-Arrays lässt sich ein haptisches Feedback in der Luft erzeugen.² Dadurch werden Nutzer*innen bei der Bedienung virtueller Regler und Knöpfe bzw. bei dem Einsatz von Gestensteuerung unterstützt und die visuelle Ablenkung kann reduziert werden.³

Der Frequenzbereich des Ultraschalls liegt direkt über den für den Menschen hörbaren Frequenzen im Bereich zwischen 20 kHz und 1 GHz, mit höheren Frequenzen nimmt allerdings auch deren Dämpfung in der Luft zu. Ultraschallsensoren operieren im automobilen Einsatz daher im Frequenzbereich zwischen 40 kHz und 70 kHz: Darüber verursacht die Schalldämpfung geringere Echoamplituden und damit geringere Reichweiten, darunter sind viele Fremdschallquellen zu finden, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis negativ beeinflusst wird.

Die Roadmap zum Modul „Ultraschall“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „Sensorfusion“, „Piezokeramische Ultraschallwandler“ und „pMUT“. Piezokeramische Ultraschallwandler sind bereits lange in Serienfahrzeugen im Einsatz. Die Technologie dient aber als Bezug für die pMUT-Technologie, bei der erst mittelfristig Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet werden.

Abbildung 67 zeigt das Funktionsprinzip eines Ultraschallwandlers (*Ultrasonic Transducer*): Der Wandler besteht aus einem piezoelektrischen Element, das durch Anlegen einer elektrischen Spannung bei einer bestimmten Frequenz zum Schwingen angeregt wird und so elektrische Energie in akustische Energie (Schallwellen) umwandelt. Die Schallwellen werden an Objekten in der Umgebung reflektiert und treffen anschließend wieder auf das piezoelektrische Element. Dieses funktioniert gleichzeitig als Sender sowie als Empfänger, wobei die Schallwellen in elektrische Energie und damit ein digitales Signal umgewandelt werden.⁴

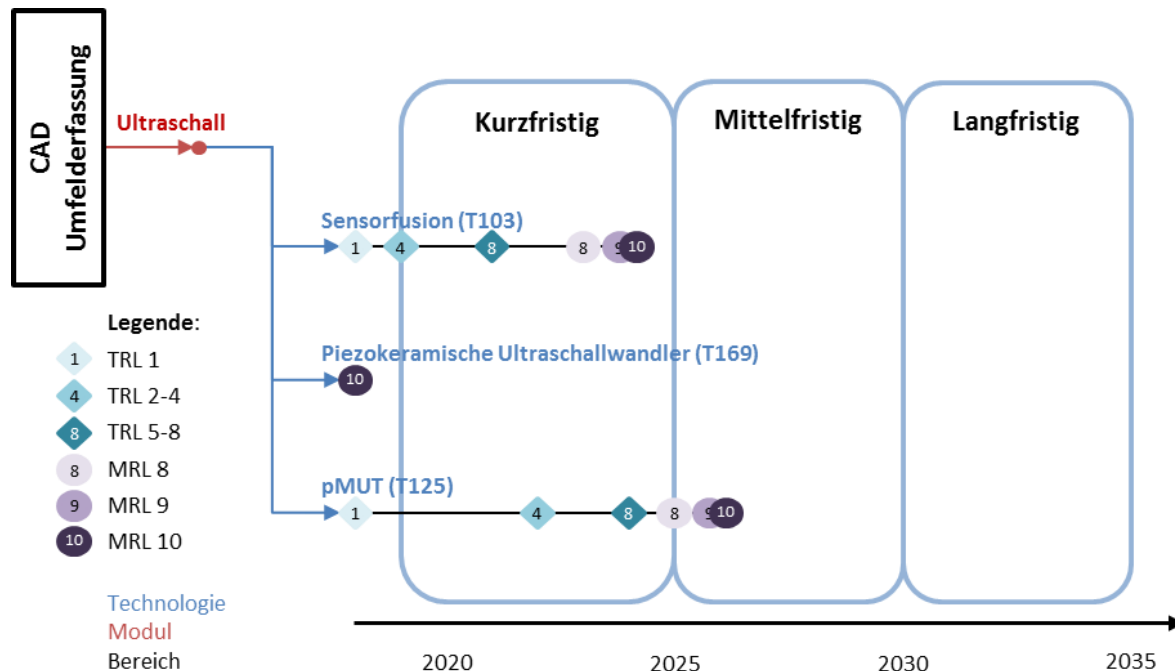


Abbildung 66: Roadmap „Ultraschall“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Für die meisten Anwendungen wird das Signal über die Time-of-Flight-Methode (Laufzeit-Methode) ausgewertet, d. h., die Entfernung ist proportional zu der Laufzeit der Schallwellen zum Objekt und wieder zurück zum Sensor. Daneben können die Signale auch über das Doppler-Verfahren (Information über die Geschwindigkeit) oder die Messung der Amplitudendämpfung (Richtung und Distanz) ausgewertet werden. Für die Messung ist es erforderlich, dass ein Mindestabstand (ca. 15 cm) zwischen Objekt und Sensor besteht, sodass genügend Zeit für die Auswertung des Echos bleibt.⁵ Für eine bessere Genauigkeit werten die einzelnen Sensoren nicht nur das „eigene“ Echo aus, sondern auch das ihrer benachbarten Sensoren (Kreuzecho). Über eine Triangulation wird die Qualität der Information erhöht.

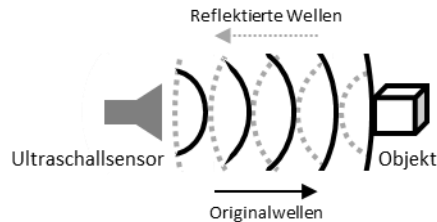


Abbildung 67: Funktionsprinzip eines Ultraschallwandlers (Quelle: eigene Darstellung)

Alle in heutigen Fahrzeugen eingesetzten Ultraschallsensoren sind ähnlich aufgebaut: Eine piezoelektrische Keramik wird auf eine metallische Scheibe geklebt. Wird die Piezokeramik angeregt, überträgt sich die Schwingung auf die Scheibe. Dadurch hat dieses akustische Wandlerelement eine größere Schwingungsenergie (höhere Reichweite). Das Wandlerelement wird über einen Entkopplungsring aus weichem Silikon in ein Gehäuse eingebettet, sodass die Schwingungen der Membran vollständig entkoppelt sind. Diese Entkopplung ist auch bei der elektrischen Verbindung des Piezoelements mit dem Kabelstrang des Fahrzeugs zu beachten.⁶

Für die Funktion als Parkhilfe werden üblicherweise je vier bis sechs Sensoren in die Front- und Heckstoßstange verbaut. Inzwischen werden vermehrt auch seitliche Sensoren eingebaut. Diese dienen auch der Totwinkelerkennung. Für eine möglichst nahtlose Erfassung der Umgebung benötigen die Sensoren einen weiten horizontalen Öffnungswinkel (120°–140°). Je höher dieser Winkel ist, desto weniger Sensoren nebeneinander werden benötigt. Vertikal darf der Öffnungswinkel nicht zu groß sein, da sonst auch Unebenheiten der Straße als Hindernis erkannt werden würden. Der Winkel wird üblicherweise mit 60°–70° ausgelegt. Die Reichweite heutiger Sensoren beträgt typischerweise von ca. 15 cm bis 5 m, Tesla verbaut Ultraschallsensoren mit einer maximalen Reichweite von 8 m.⁷

Der Aufbau und das Funktionsprinzip wurden über Jahre hinweg optimiert und haben sich bewährt. Diese Art von Ultraschallsensoren mit einer piezoelektrischen Keramik ist zudem im Vergleich zu anderen Sensoren, wie Radar oder Kamera, sehr kostengünstig in der Herstellung und nahezu witterungsunabhängig. Nur wenn Eis und Schnee das Piezoelement mit der Fahrzeugkarosserie verbinden und somit koppeln (unabhängiges Schwingen der Membran nicht mehr möglich), wird die zuverlässige Funktionsweise beeinträchtigt.

Wegen dieser Vorteile und der hohen Reife der bestehenden Technologie bedarf es wohl keiner neuen Technologien für automobiler Ultraschallsensoren. Allerdings werden in anderen Bereich, vor allem in der Medizintechnik, neue Technologien erforscht. Mikromechanisch hergestellte Ultraschallwandler (MUT) sind sehr klein und potenziell kostengünstig, da sie auf Halbleiterbasis mittels MEMS-Technologie hergestellt werden. Weitere Vorteile sind eine extrem hohe Entkopplung der Ultraschallwandler und die einfache Integration mit elektrischen Komponenten auf Halbleiterbasis. Die beiden Vertreter sind cMUT (kapazitiver MUT) und pMUT (piezoelektrischer MUT). cMUTs eignen sich aufgrund ihrer hohen Frequenz (> 1 MHz) nicht für den automobilen Einsatz, pMUTs werden in der Roadmap (siehe oben) beschrieben. Beide Typen werden den piezokeramischen Ultra-

schallwandler aber wohl nicht als Sensor für Fahrerassistenzsysteme verdrängen. Vielmehr werden neue Einsatzgebiete möglich, wie die Gestenerkennung oder die Identifikation von Fingerabdrücken.⁸

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Ultraschallsysteme“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. 6.627 Patente konnten identifiziert werden. Hiernach sind Bosch, Mercedes-Benz und Volkswagen als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Bosch führt das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, gefolgt von japanischen, französischen und südkoreanischen Institutionen. Auch ein US-amerikanischer Hersteller kann in der Rangliste identifiziert werden. Weitere fünf deutsche Unternehmen investieren in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

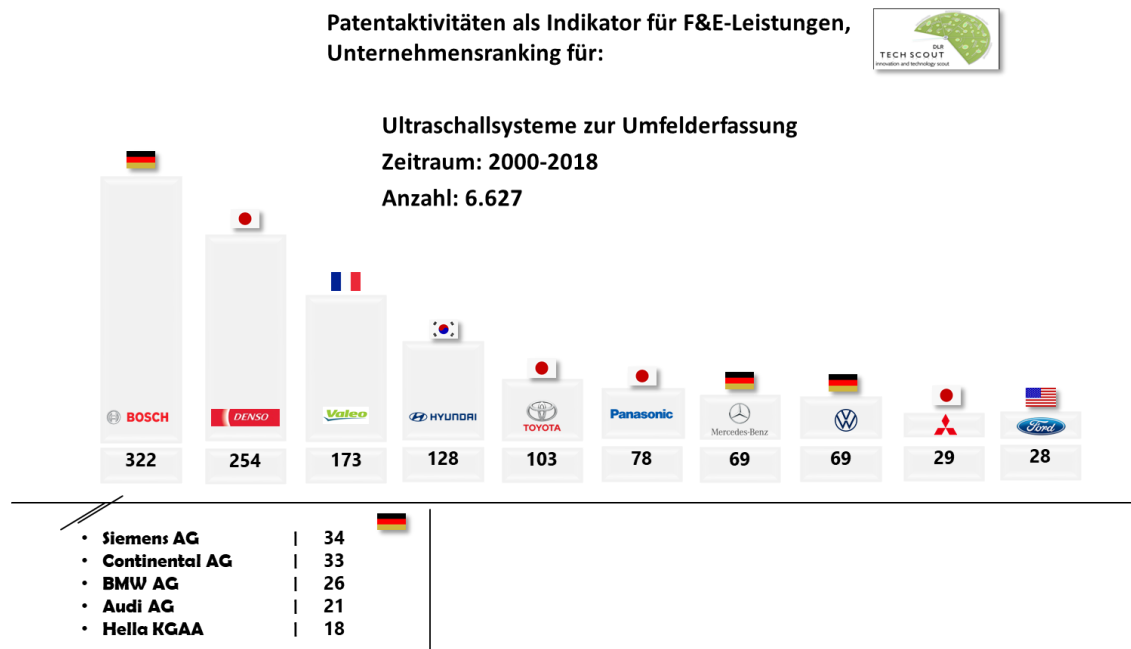


Abbildung 68: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Ultraschallsysteme zur Umfelderkennung“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

¹ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Bosch Mobility Solutions, „Totwinkelassistent“, 2019, <https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/fahrerassistenzsysteme/totwinkelassistent/>.

² Ultrahaptics, „Ultrahaptics to showcase the future of automotive HMI, gesture plus mid-air haptics, at CES 2019“, 8. Januar 2019, <https://www.ultrahaptics.com/news/announcements/automotive-hmi-ces-2019/>.

³ Kyle Harrington u. a., „Exploring the Use of Mid-Air Ultrasonic Feedback to Enhance Automotive User Interfaces“, in *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications – AutomotiveUI '18* (the 10th International Conference, Toronto, ON, Canada: ACM Press, 2018), 11–20, <https://doi.org/10.1145/3239060.3239089>.

⁴ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Priya Hosur, Rajashekar. Basavaraj Shettar, und Milind Potdar, „Environmental awareness around vehicle using ultrasonic sensors“

⁵ Hosur, Shettar, und Potdar, „Environmental awareness around vehicle using ultrasonic sensors“; Robert Bosch GmbH, „Ultraschallbasierte Fahrerassistenzsysteme: Ultraschallsensoren, Generation 6“, 2018

⁶ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*.

⁷ Hosur, Shettar, und Potdar, „Environmental awareness around vehicle using ultrasonic sensors“; Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Tesla, „Fahren in der Zukunft“, 2019, https://www.tesla.com/de_DE/autopilot.

⁸ Rob van Schaijk, „CMUT and PMUT: New Technology Platform for Medical Ultrasound“, <https://www.innovationservices.philips.com/app/uploads/2019/03/CMUT-and-PMUT-Rob-van-Schaijk-November-2018.pdf>.

2.2 CAD – Umsetzung

Die Steuerung der einzelnen Komponenten des Fahrzeugs erfolgt zukünftig vollständig auf der Grundlage elektronischer Signalübermittlung. Dabei sind einerseits Aktuatoren, andererseits auch die X-by-Wire-Technologien wichtige Bestandteile. Anstelle der mechanischen oder hydraulischen Komponenten in konventionellen Fahrzeugen übernehmen ausschließlich elektronische Komponenten Signalweitergabe und Steuerungsfunktionen. Durch die Reduktion des benötigten Bauraums ergeben sich Gewichtsvorteile sowie neue Gestaltungsmöglichkeiten. Eine Herausforderung stellt das Bordnetz dar, weil das konventionelle Bordnetz mit 12 V nicht ausreichend dimensioniert ist, um die Stromversorgung garantieren zu können.¹ Die technologischen Entwicklungen der Bordnetze wird in Abschnitt 1.2.3 behandelt.

Einzelne Komponenten werden bereits seit einigen Jahren elektronisch gesteuert, beispielsweise das Bremssystem, das Gaspedal oder die Lenkung. Allerdings verfügen sie bislang noch immer über einen Sicherheitsdurchgriff auf mechanischer oder hydraulischer Basis. Dieser dient dazu, das Fahrzeug bei einem Ausfall des elektrischen Systems kontrollieren zu können. Erfolgt die Steuerung rein elektronisch – also ohne einen mechanischen Durchgriff – muss das System (mehrfach) redundant ausgelegt sein.

Als Vorbild kann hier die Aktuatorik von Flugzeugen dienen, bei der die einzelnen Bauteile und Kommunikationssysteme jeweils mehrfach verbaut werden, sodass im Falle eines Fehlers oder Ausfalls auf die funktionstüchtigen Systeme zurückgegriffen werden kann. Langfristig gesehen werden mechanische Komponenten im Allgemeinen an Bedeutung verlieren, die Elektronik sowie die Software werden hingegen immer stärker in den Fokus der Entwicklungsanstrengungen rücken.²

Die folgenden Module fallen unter den Bereich „CAD – Umsetzung“:

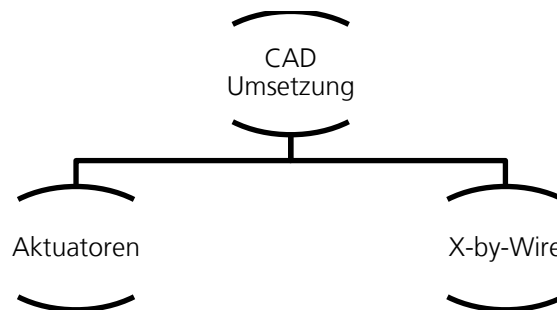


Abbildung 69: Module im Bereich „CAD – Umsetzung“ (Quelle: eigene Darstellung)

¹ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Andreas Reschka, „Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge“, in *Autonomes Fahren*, hg. von Markus Maurer u. a. (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015), 489–513, https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9_23.

² Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Christian Seider und Christina Radis, „Wenn das Auto die Kontrolle übernimmt“ (NTT Data, 2017), <https://de.nttdata.com/-/media/nttdatagermany/files/2017-de-fs-wenn-das-auto-die-kontrolle-uebernimmt.pdf>; Reschka, „Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge“.

2.2.1 Aktuatoren

Aktuatoren setzen elektrische Signale in eine mechanische Bewegung um, z. B. das von einem Steuergerät geregelte Öffnen und Schließen eines Ventils. Sie werden klassisch hauptsächlich zur Verstellung von Klappen oder Pumpensystemen genutzt oder als Elektromotoren bzw. elektromagnetische Ventile in der Motorsteuerung eingesetzt. Sie ermöglichen aber auch die Steuerung weiterer Funktionen, wie beispielsweise das ferngesteuerte Entriegeln des Kofferraums. Aktuatoren können beispielsweise hydraulisch, pneumatisch, elektrochemisch oder elektromechanisch arbeiten. Neuere Entwicklungen umfassen u. a. auch die Nutzung von Formgedächtnislegierungen oder elektroaktiven Polymeren zur Steuerung spezifischer Anwendungen.

Die Roadmap zum Modul „Aktuatoren“ umfasst die zwei zentralen Technologietrends „Hydraulische Aktuatoren“ und „Elektrische Aktuatoren“. Während Erstere bereits MRL 10 erreicht haben, werden bei elektrischen Aktuatoren kurzfristig vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet.

Im Zuge der zunehmenden Elektrifizierung und Automatisierung von Fahrzeugen kommen verstärkt elektrisch arbeitende Aktuatoren zum Einsatz, die insbesondere Sicherheits- und Assistenzfunktionen wahrnehmen und das Fahrzeug bzw. die Fahrzeuginsassen in kritischen Situationen unterstützen. Hierbei werden im Gegensatz zu hydraulischen oder pneumatischen Systemen keine zusätzlichen Systeme (wie Pumpen- und Leitungssysteme) genutzt. Vielmehr werden die von Sensoren erfassten Zustände in Steuergeräten verarbeitet, als elektrische Stellsignale übertragen und z. B. durch kleine Elektromotoren am Aktionsort umgesetzt.¹

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Aktuatoren“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Insgesamt wurden 38.445 Patente ausgewertet und fließen in nachfolgende Darstellung ein.

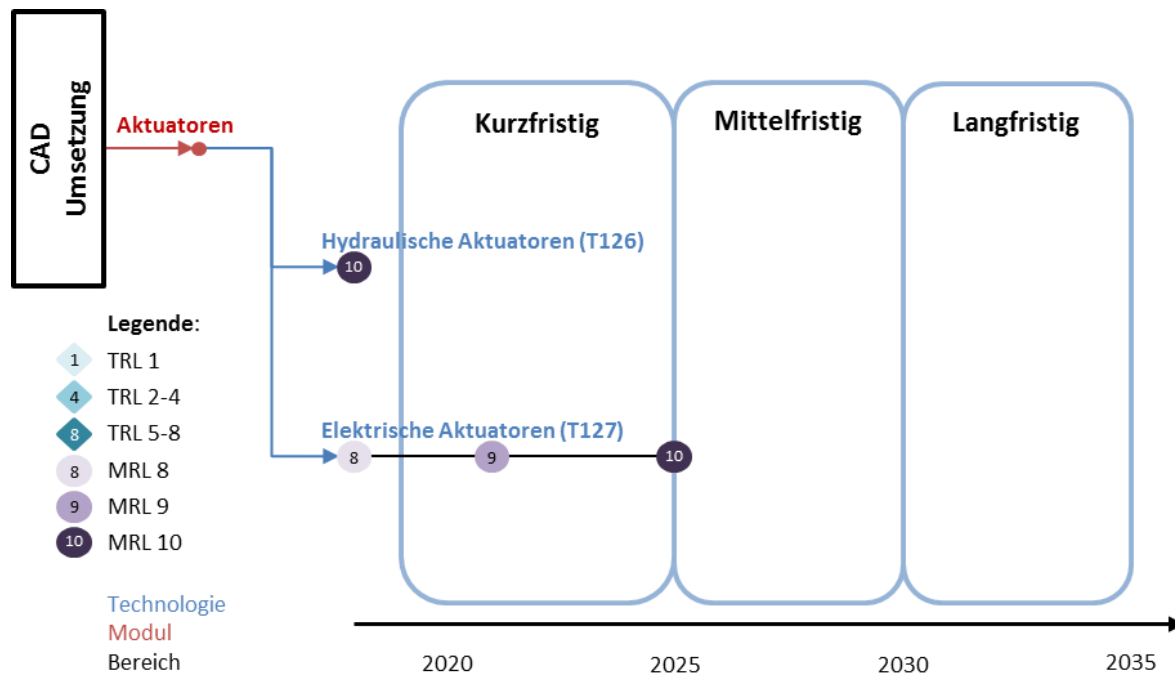


Abbildung 70: Roadmap „Aktuatoren“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Hiernach sind Bosch, Schaeffler, ZF und BMW als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Toyota führt das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, gefolgt von einem weiteren japanischen OEM. Zudem sind ein südkoreanischer OEM sowie zwei US-amerikanische Unternehmen in der Rangliste. Insgesamt sind zahlreiche deutsche Firmen in der Technologieentwicklung und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

**Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:**



Aktuatoren

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 38.445

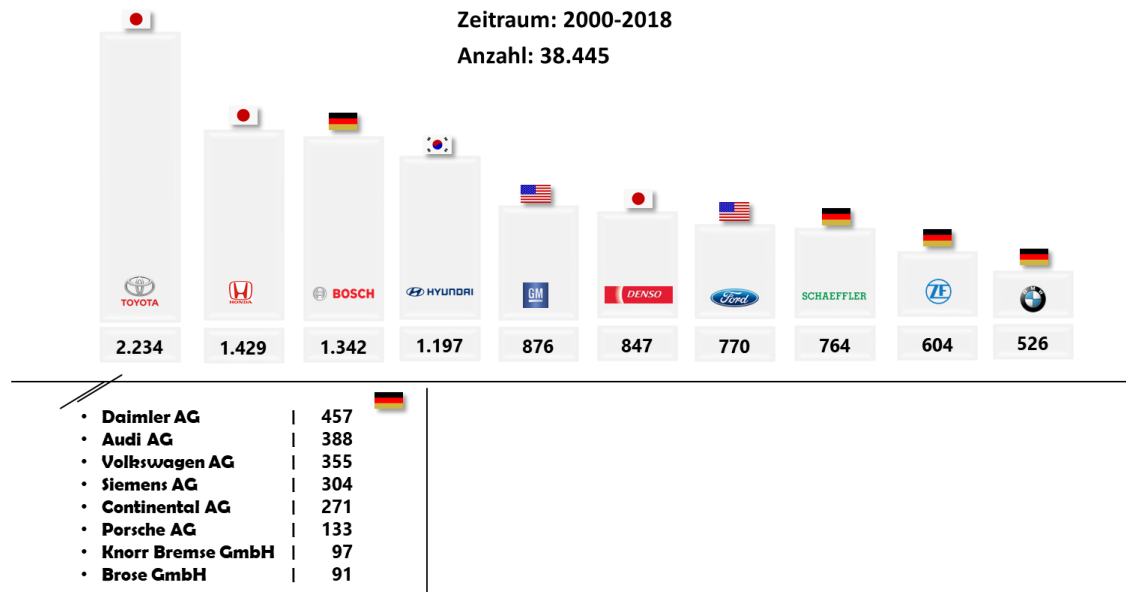


Abbildung 71: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Aktuatoren“ 2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

¹ Hans-Hermann Braess und Ulrich Seiffert, Hrsg., *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013), <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01691-3>; Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*.

2.2.2 X-by-Wire

Unter X-by-Wire wird die Substitution einer mechanischen oder hydraulischen Verbindung zweier Funktionseinheiten durch eine rein elektronische, signalbasierte Verbindung verstanden. Oft wird hierbei zuerst eine elektronische Unterstützung umgesetzt, bevor die mechanische Verbindung vollständig ersetzt wird. Zu Beginn ihrer Entwicklung wurde die Technologie vor allem für Licht- und Türsteuerungen, Scheibenwischer oder die Motorsteuerung eingesetzt, d. h. in technische Realisierungen integriert, die nur bedingt oder nicht sicherheitsrelevant sind.

Die Roadmap zum Modul „X-by-Wire“ umfasst die Technologietrends „Steer-by-Wire“ und „Brake-by-Wire“. Die Technologie „Brake-by-Wire“ ist bereits weit entwickelt. MRL 8 wurde 2019 erreicht und zukünftig werden kurzfristig vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet. Die komplementäre Technologie „Steer-by-Wire“ wird die Produktionsreife voraussichtlich erst kurz- bis mittelfristig erreichen.

Aktuelle Anwendungsbeispiele für die By-Wire Systeme sind die rein elektrische Bremssteuerung (Brake-by-Wire) oder die Lenksteuerung (Steer-by-Wire), auch die Fahrtriebssteuerung kann gänzlich elektrisch erfolgen (Drive-by-Wire). Mechanische bzw. hydraulische Komponenten zur Kopplung von Eingangsgrößen mit den entsprechenden Steuerungs-/Regelaktionen im Fahrzeug entfallen dabei. Sie werden durch Steuergeräte und elektrische Leitungsverbindungen ersetzt. Neben der Einsparung von Masse und Volumen kann auch die Fahrdynamik durch schnelle, präzise Signalübertragung gesteigert werden. Der Komfort sowie die Sicherheit werden durch eine auf Sensordaten aus dem Umfeld gestützte, softwarebasierte Unterstützung von Fahrfunktionen erhöht.¹

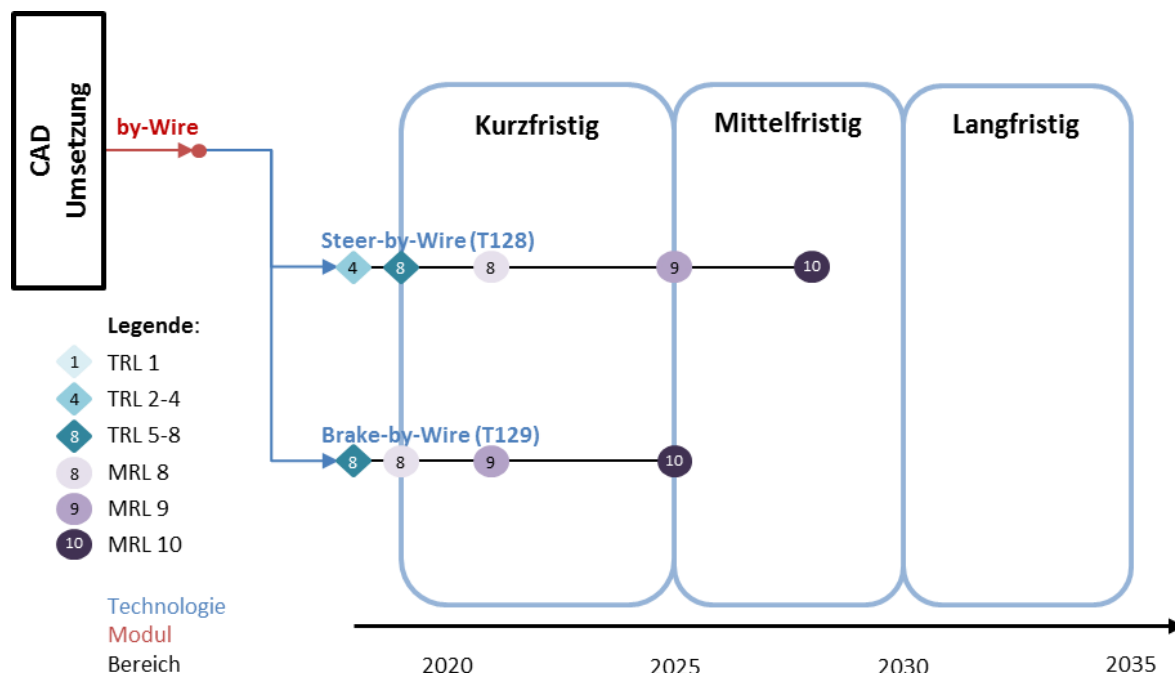


Abbildung 72: Roadmap „X-by-Wire“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Erweiterungen der jeweiligen Systeme allein durch die Software realisiert werden können, ohne dass physische Zusatzkomponenten eingebaut werden müssen. Ein Hindernis für die weitere Verbreitung der Technologie könnte die Bordnetzspannung der Fahrzeuge darstellen. Durch die Zunahme an elektronischen Bauteilen bei X-by-Wire steigt der Leistungsbedarf für das Bordnetz. Die Zunahme erfolgt zumeist proportional zur Fahrzeugmasse, da die wirkenden Kräfte steigen und die Aktuatoren damit eine höhere Leistung benötigen. Dies führt dazu, dass die Implementierung bei schweren Fahrzeugen die Leistungsgrenze übersteigt. Für einen Serieneinsatz muss daher vermutlich die Bordnetzspannung erhöht werden.²

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich X-by-Wire wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Insgesamt wurden 6.828 Patente für dieses Modul ausgewertet. Hiernach sind Continental und Bosch als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Zwei japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, zwei südkoreanische und ein britisches Unternehmen komplettieren die Rangliste. Insgesamt sind zahlreiche deutsche Unternehmen in der Technologieentwicklung und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

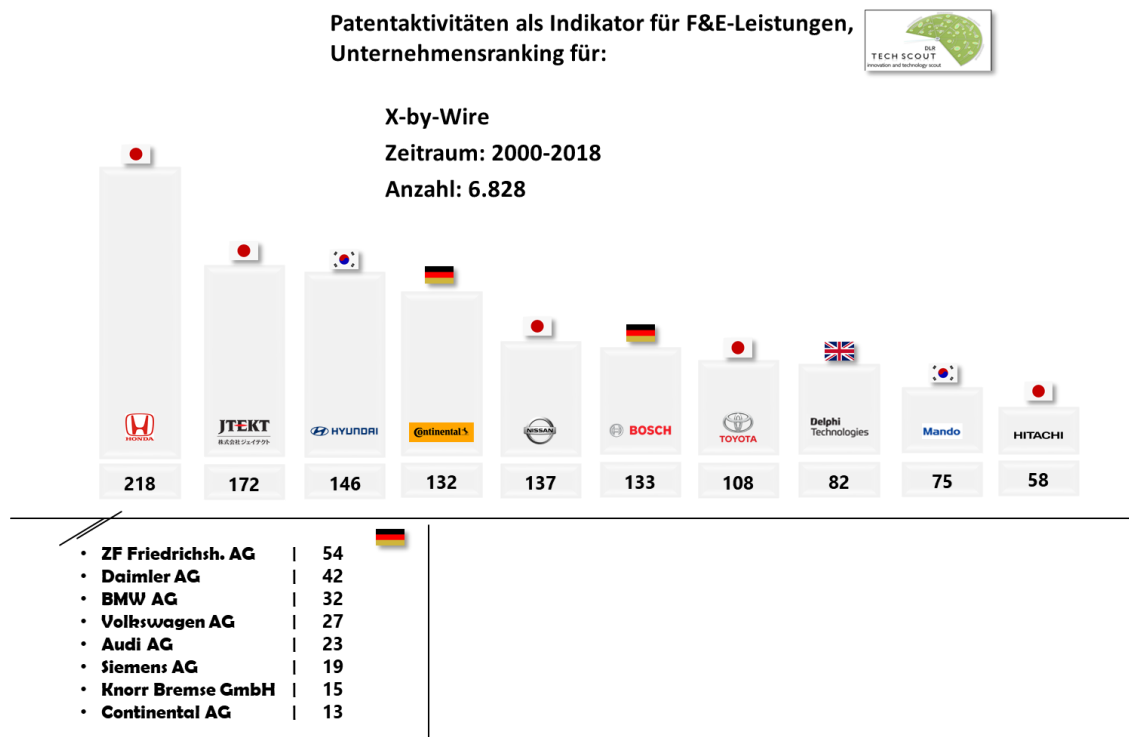


Abbildung 73: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „X-by-Wire“ 2000–2018 (Quelle: DLR TechScout)

¹ Cédric Wilwert u. a., „Design of automotive X-by-Wire systems“, 2005; Bert Breuer und Karlheinz H. Bill, Hrsg., *Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017), <https://doi.org/10.1007/978-3-658-15489-9>.

² Benjamin Hesse, „Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz unter Berücksichtigung der Fahrzeugbeherrschbarkeit“ (PhD Thesis, Duisburg, Essen, 2011), <https://duepublico.uni-due.de/servlets/DocumentServlet?id=27329>.

2.3 CAD – Navigation

Grundlage der Navigation ist die Ortung. Nur wenn die aktuelle Position zuverlässig bestimmt ist, kann das Fahrzeug navigiert werden. Für die Ermittlung der aktuellen Position werden zwei verschiedene Angaben benötigt: einerseits die absolute Position im Koordinatensystem, ergänzt durch einen Bewegungsvektor, andererseits die relative Position bezogen auf eine digitalisierte Karte des Straßennetzes. Die absolute Position wird im Anschluss mit der relativen Position verknüpft. Dadurch kann das Fahrzeug auf der Karte exakt verortet werden. Für hochautomatisierte Fahrzeuge müssen sogenannte HD-Karten eingesetzt werden, die fortwährend zu aktualisieren sind.¹

Bei der Nutzung der Navigation für Fahrassistenzsysteme ist eine hohe Genauigkeit eine wesentliche Voraussetzung – und zwar so hoch, dass ein Spurwechsel oder die Empfehlung zum Abbiegen rechtzeitig angezeigt werden können. Ein weiteres Beispiel ist die möglichst schnelle Berechnung einer Alternativroute im Fall einer falschen Routenwahl. Mobile Navigationssysteme funktionieren zum größten Teil auf Basis der GPS-Ortung. Fest im Fahrzeug verbaute Systeme verfügen häufig über eine eigene Sensorik oder greifen auf die Inertialsensorik des Fahrzeugs zurück, um auch ohne GPS-Signal eine relative Ortung zu ermöglichen.

Die Hauptkomponente für die Ortung bleibt aber die satellitenbasierte Positionierung, beispielsweise über GPS. Diese Verfahren werden weiter optimiert, um die Genauigkeit zu steigern. Weitere Ansätze verfolgen die Positionierung durch eine Trilateration der Laufzeiten von Kommunikationspfaden (z. B. über WLAN oder den Mobilfunk). Es sollten stets möglichst mehrere Wege der Positionsermittlung in Kombination genutzt werden, da die Nutzung eines einzelnen Berechnungswegs meist nicht hinreichend zuverlässig ist.

Findet der komplette Vorgang der Navigation innerhalb des Fahrzeugs statt, ist von einer Onboard-Navigation die Rede. Werden jedoch Teile dieses Vorgangs außerhalb des Fahrzeugs durchgeführt, wird von Offboard-Navigation gesprochen. Hierbei werden Teilbereiche außerhalb des Fahrzeugs berechnet und die Daten über eine Schnittstelle wieder an das Fahrzeug übertragen. Je nach Auslegung der Schnittstelle können nahezu alle Berechnungen ausgelagert werden. Dies findet in der Praxis bislang jedoch eher selten statt.

Vorteil der Auslagerung ist die Aktualität der Daten, die auf einem zentralen Server einfacher und schneller aktualisiert werden können. Von einer Hybrid-Navigation ist die Rede, wenn auf zahlreiche verschiedene Datenquellen zurückgegriffen wird. Diese können beliebig in- und außerhalb des Fahrzeugs verteilt sein. Diese Daten werden anschließend georeferenziert und können so in eine vorhandene Karte eingepflegt werden.

Die folgenden Module fallen unter den Bereich „CAD – Navigation“:

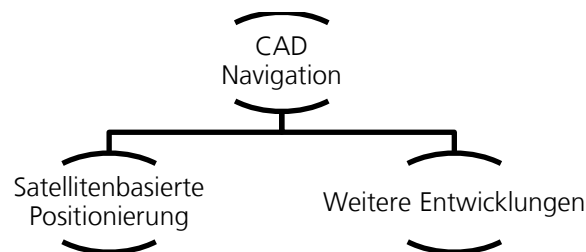


Abbildung 74: Module im Bereich „CAD – Navigation“ (Quelle: eigene Darstellung)

¹ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*.

2.3.1 Satellitenbasierte Positionierung

Die globalen Satelliten-Navigationssysteme (GNSS) werden u. a. zur Positionsbestimmung von Fahrzeugen eingesetzt. Zu den GNSS-Systemen zählt das in den USA entwickelte *Global Positioning System* (GPS) ebenso wie das Galileo-System der EU, das russische GLONASS und das chinesische COMPASS-System. Alle diese Systeme haben dieselbe Funktionsweise: über eine Funkverbindung teilen die Satelliten ihre genaue Uhrzeit und Position mit.

Der Empfänger bestimmt anschließend über eine Trilateration der Signallaufzeiten verschiedener Satelliten seine Position. Um eine exakte Positionierung zu erreichen, muss der Empfänger die Signale von mindestens vier Satelliten zeitgleich empfangen.¹ Die Positionierung über Satelliten liefert eine Genauigkeit im Meterbereich. Für den zukünftigen Einsatz in autonom gesteuerten Fahrzeugen reicht diese Genauigkeit allerdings nicht aus. Hier muss die Positionierung in einem feineren Raster, am besten zentimetergenau erfolgen.

Die Roadmap zum Modul „Satellitenbasierte Positionierung“ umfasst fünf zentrale Technologietrends. Davon sind drei Technologien weit entwickelt, zukünftig werden kurzfristig vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet. Die anderen beiden Technologien (T131 und T132) haben diesen industriellen Herstellungsreifegrad bereits erreicht.

Beim bodengestützten dGNSS werden die Satellitendaten mit Daten von exakt vermessenen Referenzstationen am Boden korrigiert. Wird von diesem Punkt mittels GNSS der Standort bestimmt, kann die Differenz der beiden Werte zur Korrektur verwendet werden. Das ermöglicht Genauigkeiten im Zentimeterbereich. Bei Multi-Konstellations- und Frequenzantennen handelt es sich um Antennen, die sowohl mehrere Frequenzen als auch verschiedene Signalarten empfangen können und auf diese Weise eine unabhängigere Positionsbestimmung ermöglichen. Diese werden u. a. bereits in der Schifffahrt eingesetzt. *Software Defined Radio GNSS* verfolgt statt hardwareseitiger Entwicklungen softwarebasierte Lösungen zur Detektion verschiedener Signalarten mit derselben Hardware.

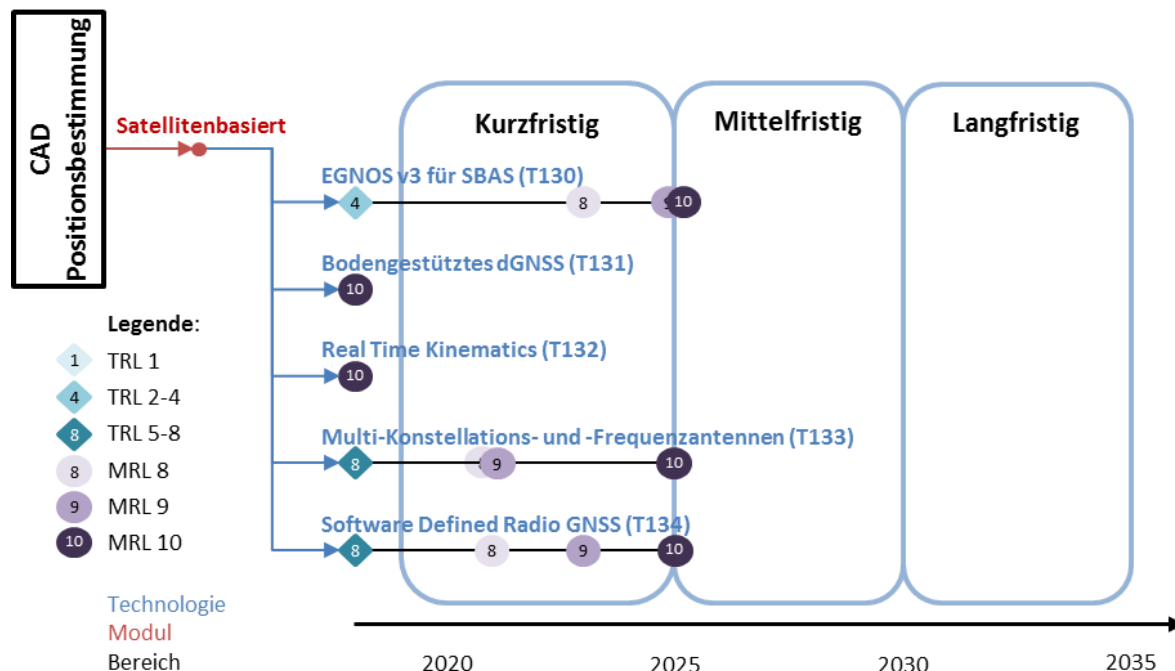


Abbildung 75: Roadmap „Satellitenbasierte Positionierung“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Die Signalübertragung der GNSS-Daten kann durch atmosphärische Störungen oder auch Spiegelungen an Gebäuden eingeschränkt werden. Aber auch Störsignale oder absichtlich verbreitete Fehlsignale und Fehlfunktionen des Systems selbst können die Ortung erschweren oder verhindern.² Dies kann bei der Steuerung hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge schwerwiegende Folgen haben.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in der satellitenbasierten Positionierung wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt. Im Betrachtungszeitraum wurden 418 Patente analysiert und ausgewertet. Hiernach ist kein deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. US-amerikanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an, je eine französische, schweizerische, kanadische und chinesische Institution komplettieren die Liste. Nur zwei deutsche Unternehmen investieren in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

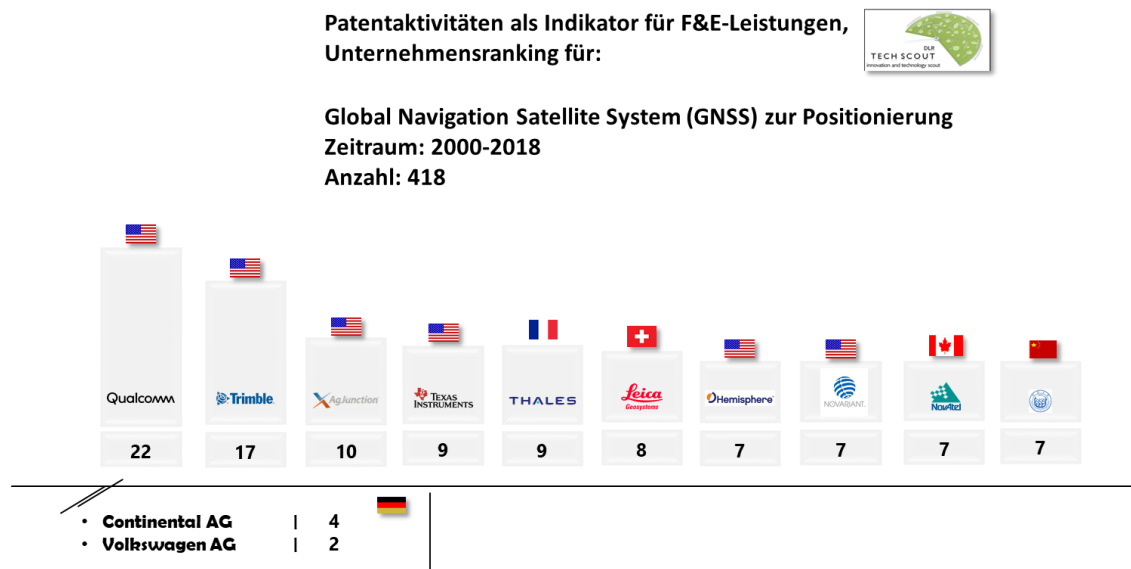


Abbildung 76: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Satellitenbasierte Positionierung“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

¹ T. Strang u. a., „Lokalisierungsverfahren“ (Oberpfaffenhofen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Juni 2008), https://elib.dlr.de/54309/1/Lokalisierungsverfahren_v22.pdf.

² Gianluca Marucco und Matteo Vannucchi, „Towards Autonomous Driving on road: the E-GNSS contribution“, https://www.slideshare.net/EU_GNSS/towards-autonomous-driving-on-road-the-egnss-contribution-from-basic-concepts-to-local-integrity.

2.3.2 Weitere Entwicklungen bei der Positionierung

Neben der Positionsbestimmung mittels Satellitendaten wurden in den vergangenen Jahren einige weitere Methoden und Technologien entwickelt, die die Navigation per GPS ergänzen oder ersetzen könnten. Sie sind besonders für die Navigation per GPS an Orten geeignet, an denen GPS-Signale nicht oder nur schlecht empfangen werden können, oder für Anwendungen, für die eine präzisere Ortung benötigt wird. Die WLAN-basierte Positionsbestimmung wird beispielsweise in Gebäuden genutzt, wo GPS-Signale nicht oder nur schlecht empfangen werden können.

Die Roadmap zum Modul „Weitere Entwicklungen bei der Positionierung“ umfasst sieben Technologietrends. Davon sind bisher nur die MEMS-basierten Navigationssensoren marktreif und im Einsatz. In demselben Technologiesteckbrief werden auch NEMS behandelt. Diese sind dagegen noch in der frühen Phase der technologischen Entwicklung. Die übrigen Technologien werden die erste Marktreife (MRL 8) voraussichtlich größtenteils bis spätestens 2030 erreichen. Zu drei Technologien konnte bisher keine Einschätzung der zukünftigen Reifegradentwicklung getroffen werden. Diese befinden sich derzeit (Stand 2019) zwischen TRL 4 und MRL 8.

Die Positionsbestimmung erfolgt zumeist über das Prinzip der Trilateration. Nach demselben Prinzip erfolgt auch die Ortung mittels M-MIMO (*Massive Multiple Input, Multiple Output*), einer Kerntechnologie des 5G-Netzes.

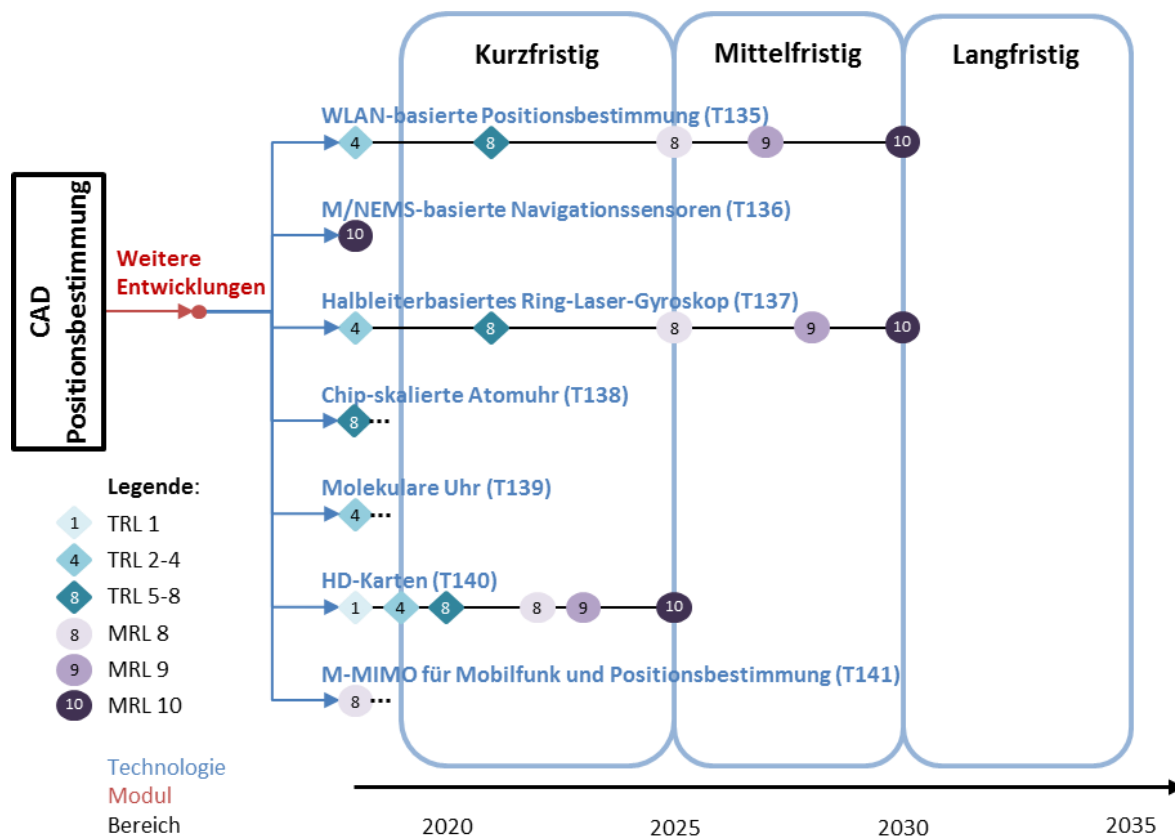


Abbildung 77: Roadmap „Positionsbestimmung – weitere Entwicklungen“ 2020–2035
(Quelle: eigene Darstellung)

Eine Ergänzung für eine relative Positionierung ohne Satellitenempfang ist der Einsatz von MEMS-/NEMS-Sensoren (mikro-/nano-elektro-mechanisches System) als Inertialsensorik des Fahrzeugs. Unter MEMS- oder NEMS-basierten Inertialsensoren versteht man sehr kleine Sensoren auf Halbleiterbasis, die Bewegungsdaten des Fahrzeugs an das Navigationssystem liefern.

HD-Karten basieren auf einer sehr großen Anzahl einzelner Datenpunkte. Diese hochauflösenden Karten stellen nicht nur die Straße und deren Verlauf dar, sondern auch eine Vielfalt zusätzlicher Informationen, die für den Betrieb autonomer Fahrzeuge wichtig sind. Dazu gehören u. a. Fahrspuren, Spurbreiten, Steigungen, Verkehrszeichen oder Brücken. Ein Ansatz zur Verbesserung der satellitenbasierten Ortung sind bspw. Chip-skalierte Atomuhren. Diese sind deutlich präziser als MEMS- oder Quarzkristall-Oszillatoren. Die präzisere Zeitbestimmung ist unerlässlich für eine exakte Positionsbestimmung aus der Trilateration der Signallaufzeiten, denn dafür müssen die Uhren zwischen Fahrzeug und Satellit perfekt synchron sein.

Aufgrund der hohen Diversität der Technologien in diesem Modul konnte an dieser Stelle keine aussagekräftige Patentanalyse durchgeführt werden.

2.4 CAD – Kommunikation

Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander sowie mit der Infrastruktur kann über verschiedene drahtlose Wege der Datenübertragung erfolgen. Die Technologien zur Informationsübertragung haben verschiedene Reichweiten. So sind einige Technologien besonders gut zur Kommunikation über kurze Distanzen geeignet, während andere Vorteile in der Langstreckenkommunikation haben.

V2X und C2X fassen die Interaktionspartner zusammen: V bzw. C steht für das Fahrzeug (*Vehicle* bzw. *Car*). Unter X sind Stakeholder subsummiert: beispielsweise die Infrastruktur, die Cloud bzw. das Backend oder Fußgänger (*Pedestrian*). Entsprechend spricht man von V2V, V2I, V2P bzw. C2C, C2I etc.

Einige dieser Kommunikationswege basieren auf der Mobilfunktechnologie, andere auf der WLAN-Technologie. Das Netzwerk DSRC (*Dedicated Short Range Communication*) basiert auf WLAN und kommuniziert über kurze Entfernungen. Dabei können sowohl die Fahrzeuge selbst als auch Komponenten der Infrastruktur Daten empfangen und weiterleiten. Technologien auf Mobilfunkbasis haben eine größere Reichweite, sind aber von Funklöchern oder dem Wechsel zwischen einzelnen Funkzellen herausgefordert.

Wichtig bei der Kommunikation sind geeignete Standards. Durch die so erreichbare Vereinheitlichung kann die Kommunikation erleichtert werden. Gemeinsame Ziele der diversen Standards sind die Reduzierung der Verbindungszeiten und die Erhöhung der Datenübertragungsrate. Daraus folgt eine Verbesserung der Verkehrssicherheit durch Vermeidung gefährlicher Situationen. Bislang ist noch nicht absehbar, welcher Kommunikationsstandard sich durchsetzen wird.¹

Durch die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander bzw. mit anderen Teilnehmern im Straßenverkehr einschließlich der Infrastruktur können sicherheitsrelevante Funktionen etabliert werden. Beispielsweise können vorausfahrende die nachkommenden Fahrzeuge vor Gefahrensituationen warnen. Die EuroNCAP nimmt die Car2X-Kommunikation ab 2024 in die Sicherheitsbewertung auf.

Angesichts neuer, leistungstärkerer Sensoren, die eine große Menge an Daten der Umgebung produzieren, müssen auch die fahrzeuginternen Datenübertragungswege verbessert werden. Dafür wird vor allem das Automotive-Ethernet als zentraler Kommunikationskanal genutzt.

Der Bereich „CAD – Kommunikation“ umfasst die folgenden Aspekte:

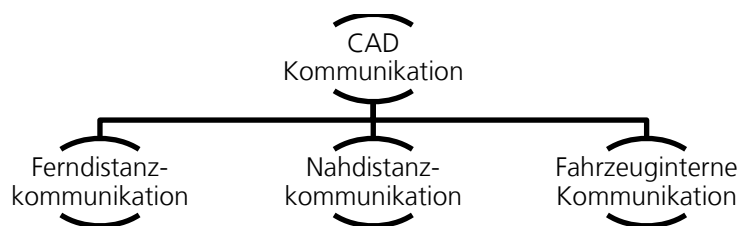


Abbildung 78: Module im Bereich CAD Kommunikation (Quelle: eigene Darstellung)

¹ Fabio Arena und Giovanni Pau, „An Overview of Vehicular Communications“, *Future Internet* 11, Nr. 2 (24. Januar 2019): 27, <https://doi.org/10.3390/fi11020027>; Cédric Malaquin und Antoine Bonnabel, „Radar and Wireless for Automotive: Markets and Technology Trends 2019“ (Yole Développement, 2019), https://yole-i-micronews-com.osu.eu-west-2.outscale.com/uploads/2019/03/YD19009_Radar_and_Wireless_for_Automotive_2019_Sample-2.pdf.

2.4.1 Ferndistanzkommunikation

Die Kommunikation über größere Distanzen zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur ist ein zentraler Bestandteil zukünftiger Verkehrskonzepte. Bereits heute gibt es einzelne Modelleinsätze solcher Kommunikation, für einen flächendeckenden Ausbau ist ein einheitlicher Kommunikationsstandard, wie beispielsweise 5G, notwendig. Diese Kommunikation soll sowohl die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer erhöhen, als auch den Verkehrsfluss verbessern. Beispielsweise können die Fahrzeuginsassen bzw. das Fahrzeug vor Gefahren hinter einer Kurve gewarnt werden.¹

Außerdem können durch die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander sowie mit der Infrastruktur Staus vermieden und die passende Geschwindigkeit für eine „grüne Welle“ berechnet werden. Das wiederum sorgt durch das Vermeiden von Stop-and-Go-Verkehr sowohl für eine geringere Lärmbelastung als auch für einen niedrigeren Treibstoffbedarf. So können ebenfalls Emissionen von Luftschadstoffen oder der Bremsabrieb verringert werden. Die Datenübermittlung muss durch IT-Sicherheitstechnologien geschützt und so die Daten vor Manipulation und Diebstahl bewahrt werden. Zu diesem Zweck ist ein einheitlicher Kommunikationsstandard vorteilhaft.

Die Roadmap zum Modul „Ferndistanzkommunikation“ umfasst fünf zentrale Technologietrends. Während bei der Technologie T141 bisher keine Einschätzung zu der zukünftigen Entwicklung der Reifegrade (MRL 8 in 2019) getroffen werden konnte, erreicht voraussichtlich keine der anderen Technologien MRL 10 vor 2025. Kurzfristig sind bei diesen Technologien vor allem Impulse in Richtung TRL 8 und MRL 8 zu erwarten.

Ein gutes Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung einer Ferndistanzkommunikation ist das EU-weit für neu zugelassene Fahrzeuge verpflichtende eCall-System. Sobald bei einem Unfall die Airbags ausgelöst werden, wird automatisch ein Notruf an die nächste Rettungsleitstelle gesendet. Das Fahrzeug übermittelt automatisch seine Position, zusätzlich gibt es eine Sprachverbindung. Der Datenschutz wird beim eCall-System eingehalten, indem nur die Rettungsleitstelle auf die übermittelten Daten zugreifen kann.²

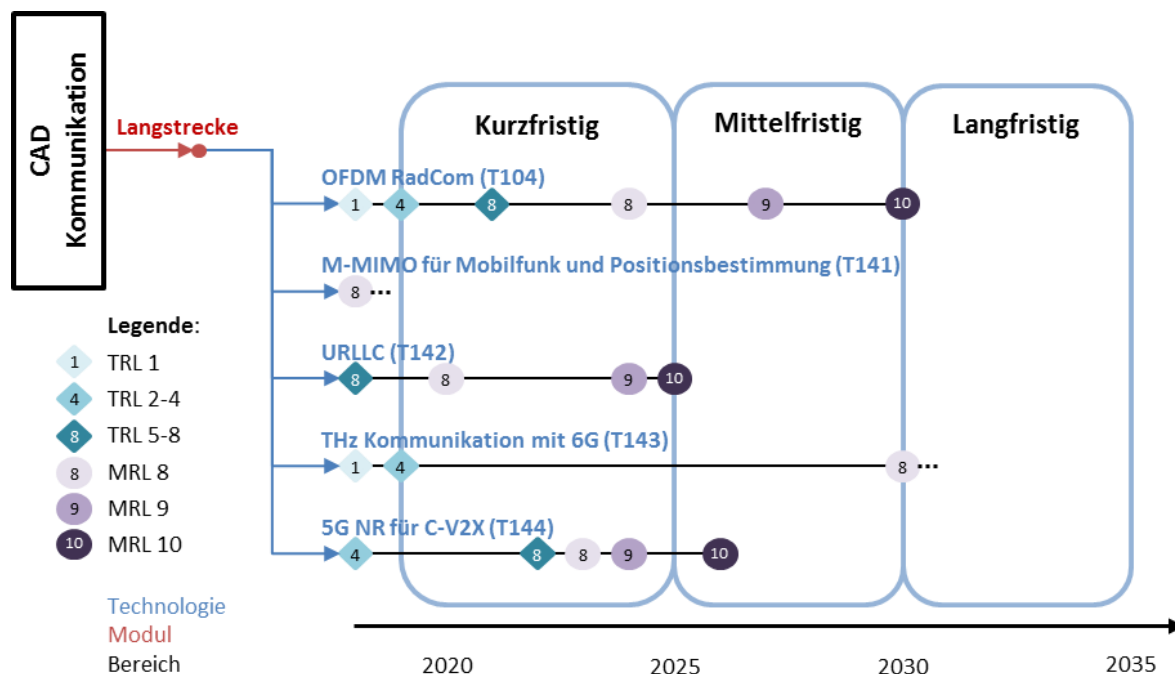


Abbildung 79: Roadmap „Ferndistanzkommunikation“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Vollumfänglich werden die Funktionen durch Ferndistanzkommunikation allerdings erst dann in der Praxis einsetzbar, wenn der Mobilfunk entsprechend weit und durchgängig ausgebaut ist. Eine hohe Bandbreite ist dabei ebenso wichtig wie geringe Latenzen. Die betrachteten Technologien sind in der Roadmap dargestellt.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Ferndistanz-kommunikation“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 211 Patente im gesamten Zeitraum identifiziert. Hiernach ist nur Bosch als deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen führen das Ranking nach Patentzahl insgesamt an. Auch zwei südkoreanische sowie ein US-amerikanisches Unternehmen sind in der Rangliste vertreten. Mit Continental, Daimler, Audi und Siemens sind vier weitere deutsche Firmen in der Technologieentwicklung und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

**Patentaktivitäten als Indikator für F&E-Leistungen,
Unternehmensranking für:**



Long distance communication

Zeitraum: 2000-2018

Anzahl: 211

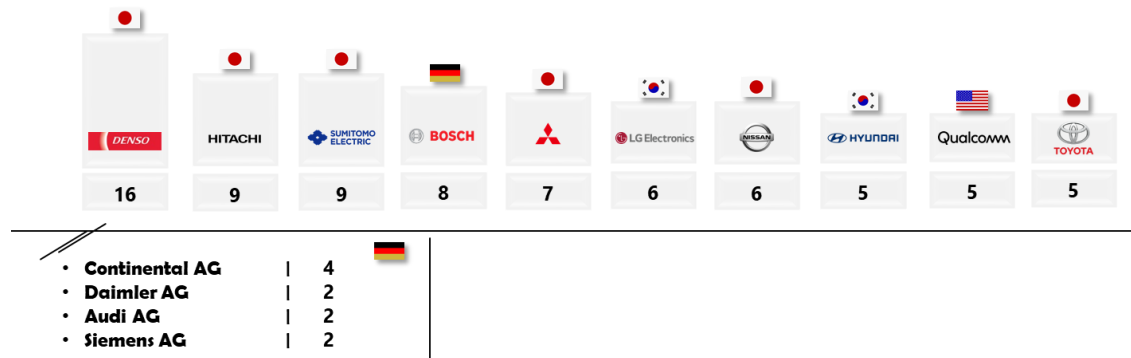


Abbildung 80: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Ferndistanzkommunikation“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

¹ Arena und Pau, „An Overview of Vehicular Communications“.

² European Commission, „Press release - eCall: Automatischer Notruf für Verkehrsunfälle ab 2015 Pflicht in Autos“, 13. Juni 2013, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-534_de.htm.

2.4.2 Nahdistanzkommunikation

Ebenso wie bei der Ferndistanzkommunikation werden bei der Kommunikation im Nahbereich Verbindungen zwischen Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern ermöglicht. Bei der Nahdistanzkommunikation werden allerdings in der Regel nur Strecken unter einem Kilometer betrachtet. So erstreckt sich die Reichweite von DSRC (*Dedicated Short Range Communication*) auf 1 km bei Sichtverbindung und auf 300 m, wenn keine Sichtverbindung besteht.¹ In einzelnen Fällen ist der Sichtkontakt sogar für die Funktionsweise erforderlich, wie beispielsweise bei der lichtbasierten Kommunikation.

Die Roadmap zum Modul „Nahdistanzkommunikation“ umfasst fünf zentrale Technologietrends. Keine der Technologien hat bisher MRL 9 erreicht. mmWave 5G ist mit MRL 8 in 2019 die bisher reifste Technologie. Allerdings werden voraussichtlich andere Technologien in diesem Bereich vorher MRL 10 erreichen. Für die drei Technologien T144, T145 und T147 werden kurzfristig vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet. Bei den Technologien T148 (TRL 8 in 2019) und T175 (TRL 4 vor 2019) konnte die zukünftige Entwicklung der Reifegrade bislang nicht eingeschätzt werden. Dennoch sollte die Entwicklung der Reifegrade dieser beiden Technologien weiterverfolgt werden.

Ein anschauliches Beispiel für die Kurzstreckenkommunikation ist die C2X-Kommunikation, die im VW Golf 8 serienmäßig vorhanden ist und andere Verkehrsteilnehmer vor erfassten Gefahrensituationen warnt. Diese Art der Kommunikation ähnelt in Aufbau und Funktion konventionellen WLAN-Routern. Die Kommunikation erfolgt über Funk und hat eine Reichweite von etwa 150 m in Innenstädten, auf dem Land kann sie bis zu 800 m betragen.²

Ebenso wie beim Mobilfunk ist ein weiterer Ausbau der Infrastruktur mit entsprechender Hardware für die Nahdistanzkommunikation erforderlich. Allerdings ist dieser Ausbau deutlich kostengünstiger als der Aufbau des 5G-Mobilfunknetzes. Da verschiedene Technologien zeitgleich eingesetzt werden, müssen die Fahrzeuge für verschiedene Standards ausgerüstet werden.

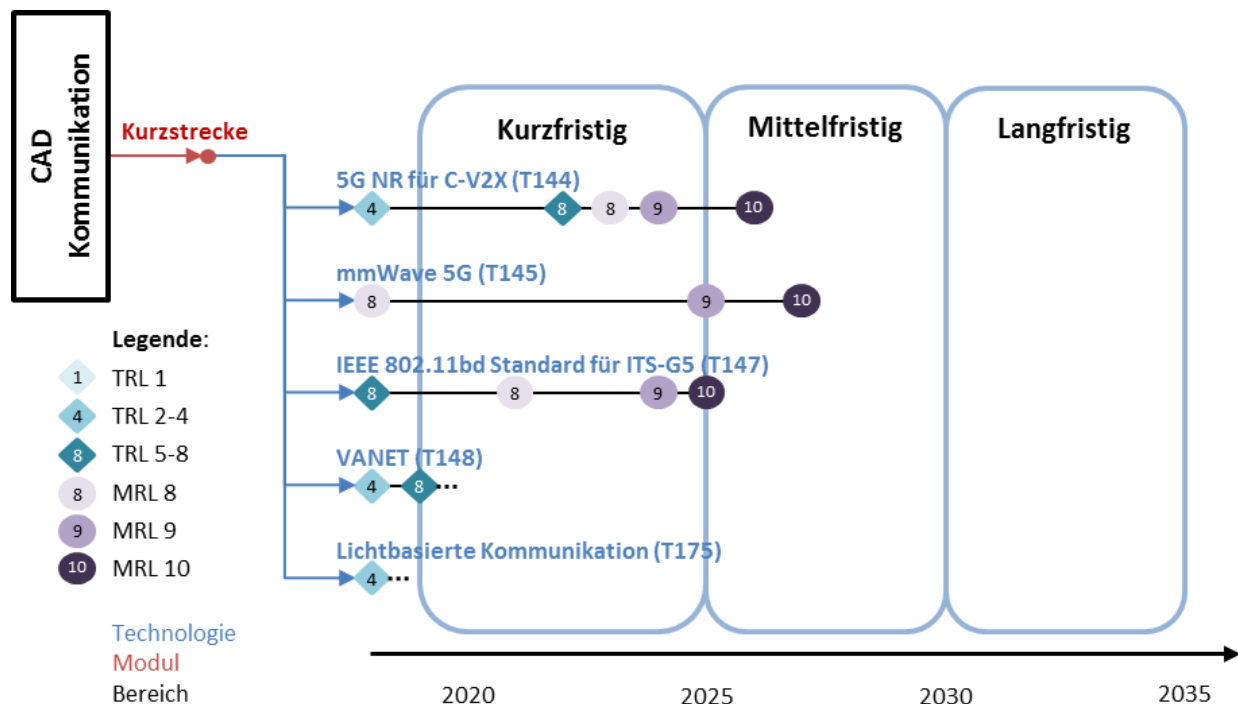


Abbildung 81: Roadmap „Nahdistanzkommunikation“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Nahdistanzkommunikation“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 2.395 Patente im gesamten Zeitraum identifiziert. Hiernach ist kein deutsches Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Japanische Unternehmen dominieren das Ranking nach Patentzahl insgesamt. Daneben können zwei südkoreanische und ein US-amerikanisches Unternehmen in der Darstellung gezeigt werden. Mit Bosch, Volkswagen, Daimler, Continental und Siemens sind weitere fünf deutsche Unternehmen in der Technologieentwicklung und mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

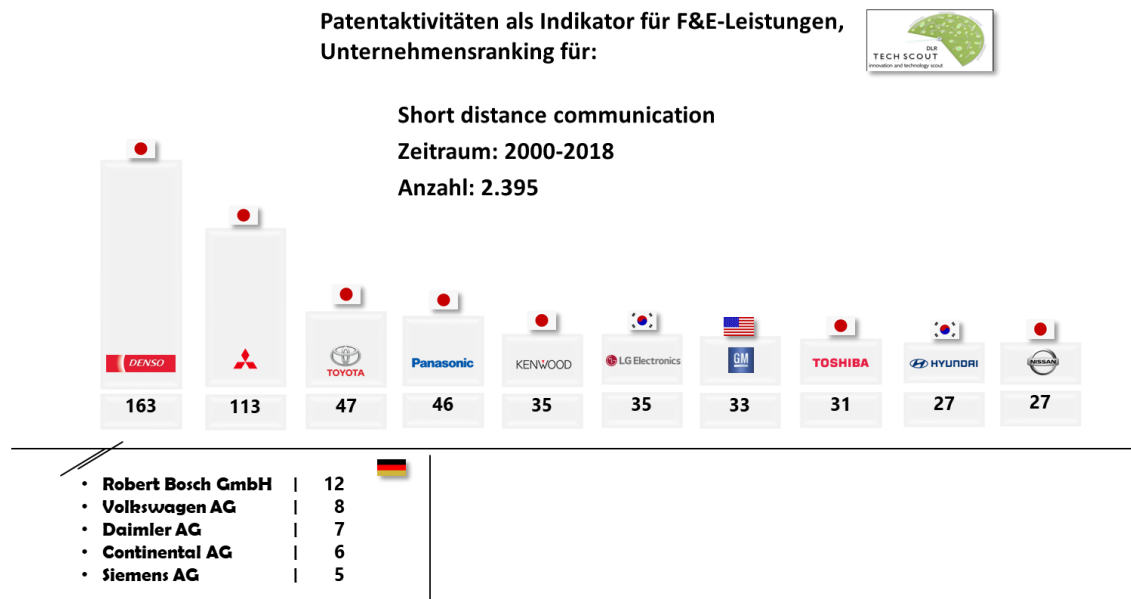


Abbildung 82: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Nahdistanzkommunikation“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

¹ Robert Lembke, „DSRC und C-V2X im Vergleich“, Springer Professional, 6. März 2018, <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/automobilelektronik---software/dsrc-und-c-v2x-im-vergleich/15476434>.

² VW, „Car2X: die neue Ära intelligenter Fahrzeugvernetzung“, 2018, <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2018/10/car2x-networked-driving-comes-to-real-life.html>.

2.4.3 Fahrzeuginterne Kommunikation

Auch innerhalb des Fahrzeugs ist eine schnelle und zuverlässige Kommunikation bedeutsam. Vor allem steigen die Anforderungen an Übertragungsgeschwindigkeit und Bandbreite durch zusätzliche Sensorik für die Automatisierung. In heutigen Fahrzeugen ist der Kabelbaum die drittschwerste Komponente nach der Karosserie und dem Motor. Im Zuge der Bemühungen, Fahrzeugmassen zu senken und damit mittelbar den Energiebedarf zu reduzieren, wird folglich auch die E/E-Architektur speziell in dieser Hinsicht weiterentwickelt. Die derzeitige Architektur sieht für die meisten Fahrzeuge eine enorme Anzahl an einzelnen Steuergeräten (über 100) vor, da bisher nur wenige Fahrzeugfunktionen in einem Steuergerät integriert werden. Zudem sind diese an verschiedenen Stellen im Fahrzeug verbaut. Daraus folgt ein komplexer Aufbau eines Kabelnetzwerks, das zunehmend wächst.¹

Die Roadmap zum Modul „Fahrzeuginterne Kommunikation“ umfasst die drei zentralen Technologietrends „CAN FD“ (T149), „Kupferbasiertes Automotive-Ethernet“ (T174) und „Optisches Automotive-Ethernet“ (T150). Bei den Reifegraden der Technologien zeigen sich deutliche Unterschiede: T174 ist bereits in Serienfahrzeugen im Einsatz, während bei T150 kurzfristig erst TRL 4 und TRL 8 zu erwarten sind. MRL 10 wird bei dieser Technologie voraussichtlich erst zwischen 2025 und 2030 erreicht. Bei CAN FD werden kurzfristig vor allem Impulse bei dem industriellen Einsatz in Massenfahrzeugen erwartet.

Neue Ansätze, wie beispielsweise der Einsatz von *Systems on a Chip* (SOC), würden den bisherigen Aufbau deutlich verändern. Außerdem existieren Ansätze, wieder mehr Fahrzeugfunktionen auf wenige und dafür leistungsstarke Zentralrechner zusammenzufassen. Steuergeräte und Verkabelungen können auf diese Weise reduziert und vereinfacht werden. Das kann nicht nur Masse, sondern auch Kosten in der Herstellung der Kabelbäume einsparen.

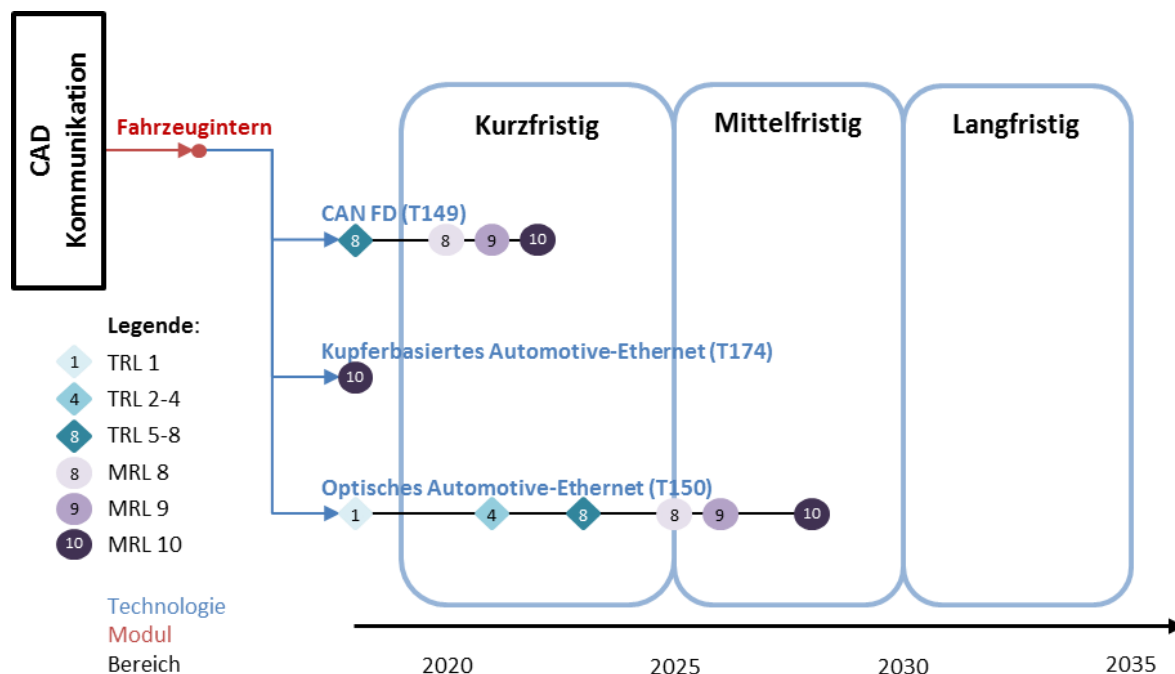


Abbildung 83: Roadmap „Fahrzeuginterne Kommunikation“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

In zukünftigen Fahrzeugen werden vermehrt hohe Bandbreiten und kurze Latenzzeiten zum einen für Assistenzsysteme und zum anderen auch für aufwändige Entertainment-Systeme in der internen Kommunikation benötigt. Das Rückgrat des neuen Systems ist die Technologie des Automotive-Ethernet (vgl. T174 und T150). Eine weitere wesentliche Anforderung an die eingesetzten Technologien ist der Schutz der Kommunikation vor Zugriffen Dritter, vor allem weil immer mehr sicherheitskritische Fahrfunktionen integriert werden. Die Roadmap gibt einen Überblick über die betrachteten Technologien im Bereich „Fahrzeuginterne Kommunikation“.

Zur Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich „Fahrzeuginterne Kommunikation“ wurde eine weltweite Analyse von Patentanmeldungen ab dem Jahr 2000 beim Europäischen Patentamt (EPO) durchgeführt und 941 Patente im gesamten Zeitraum identifiziert. Hiernach sind BMW, Siemens, Continental und Mercedes-Benz als deutsche Unternehmen in den Top Ten weltweit vertreten. Zwei chinesische, ein südkoreanisches und drei US-amerikanische Unternehmen komplettieren die Darstellung. Mit Bosch und Audi investieren zwei weitere deutsche Firmen in die Technologieentwicklung und sind mit Patentanmeldungen in diesem Bereich aktiv.

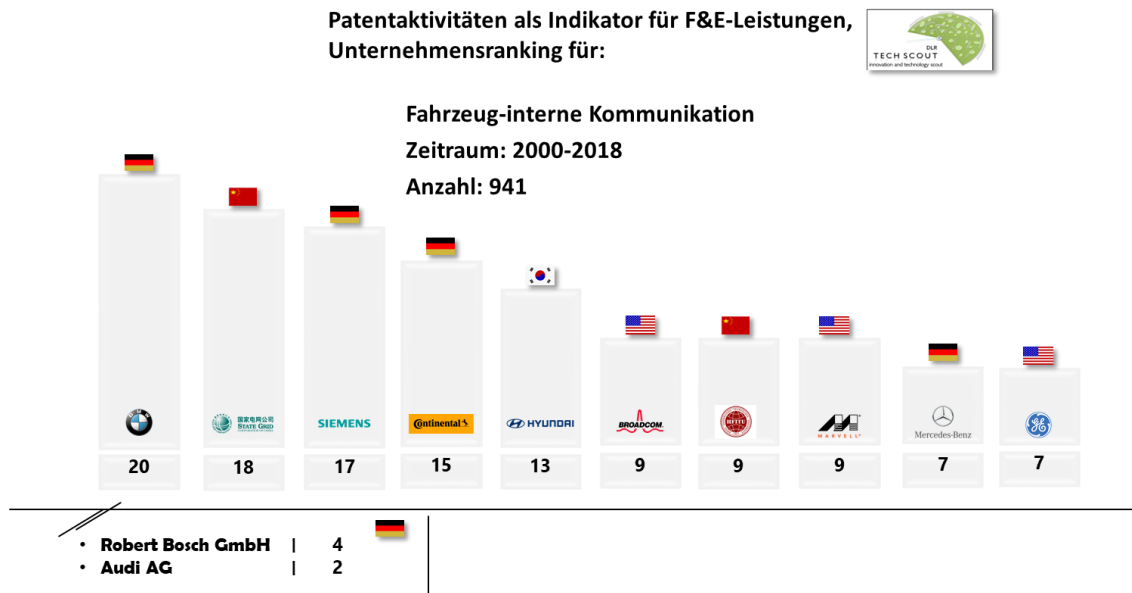


Abbildung 84: F&E-Aktivitäten/Patentanalyse im Bereich „Fahrzeuginterne Kommunikation“ 2000–2018
(Quelle: DLR TechScout)

¹ Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Braess und Seiffert, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*.

2.5 Exkurs: Mikrosystemtechnik als *Enabler*-Technologie

Seit den 1960er bzw. 1970er Jahren beeinflusste vor allem die Mikroelektronik die Entwicklung verschiedener Technologiebranchen sowie die Veränderung der Gesellschaft insgesamt auf beträchtliche Weise. Durch die Produktion von Transistoren und anderen Halbleiter-Elementen in großer Stückzahl zu geringen Kosten und die hohe Integration der Komponenten auf einzelnen Schaltkreisen (erhöhte Packungsdichte) wurden leistungsstarke Mikroprozessoren möglich. Diese sind verantwortlich für den Erfolg von Computern und nachfolgend vielen anderen Geräten, wie beispielsweise Smartphones. Bis heute bestätigt sich das „Gesetz“ von Gordon Moore, nach dem sich die Komplexität integrierter Schaltkreise wiederholend im selben Intervall verdoppelt.

Mikrosysteme erweitern den Funktionsumfang eines Mikroprozessors, der auf rein elektrischen Vorgängen basiert. Durch die zusätzliche Integration mechanischer, (bio)chemischer bzw. optischer Verfahren steigt die Leistungsfähigkeit der Systeme signifikant. Je nach Funktionsumfang werden sie auch als MEMS (*Microelectromechanical Systems*), MOEMS (*Microoptoelectromechanical Systems*) etc. bezeichnet. Die Mikrosysteme grenzen sich durch ihre Größe von 0,1 bis 1000 Mikrometern von makroskopischen oder Nano-Systemen ab. Sie vereinen demnach verschiedenste Funktionen in einem abgeschlossenen System auf einer winzigen Fläche.¹

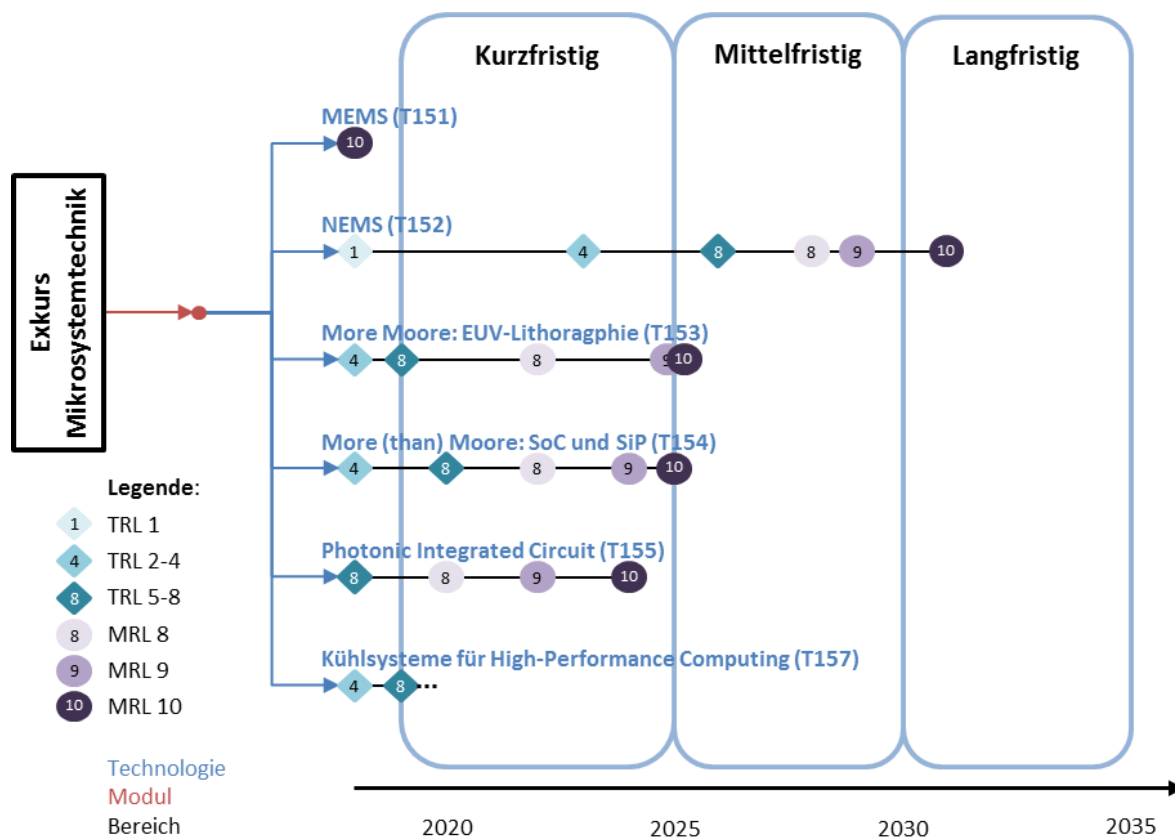


Abbildung 85: Roadmap „Mikrosystemtechnik“ 2020–2035 (Quelle: eigene Darstellung)

Die Roadmap zum Modul „Mikrosystemtechnik“ umfasst die Technologietrends „MEMS“, „NEMS“, „EUV-Lithografie“, „More (than) Moore“, „Photonic Integrated Circuits“ und „Kühlsysteme für High Performance Computing“. Die meisten Technologien sind bereits weit entwickelt, zukünftig werden kurzfristig vor allem Impulse bei der industriellen Herstellung erwartet. Die MEMS-Technologie wird bereits seit Langem erfolgreich in Masse produziert. Die NEMS-Technologie befindet sich hingegen noch in der Grundlagenforschung und wird voraussichtlich erst langfristig in die automobilen Massenproduktion einziehen.

Mikrosysteme bestehen in der Regel aus einem Sensor, einem Aktor und einer Steuereinheit, integriert auf einem Halbleitersubstrat (Chip). Die Sensoren und Aktoren bilden die Schnittstelle zur Umwelt, während die Recheneinheit die erfassten Daten in Befehle umwandelt. Zu Beginn wurden Mikrosysteme wie Transistoren auf dem Halbleitermaterial Silizium entwickelt. Inzwischen werden weitere Werkstoffe, wie Kunststoffe, erfolgreich eingesetzt. Die Herstellungsverfahren basieren ebenfalls auf denen der Mikroprozessorfertigung – vor allem der Photolithografie. Daher können viele MEMS als Massenprodukt ähnlich kostengünstig produziert werden wie Mikroprozessorchips.

Durch ihren geringen Platzbedarf, die enorme Leistungsfähigkeit inklusive diverser Funktionen und geringe Kosten haben die Mikrosysteme nahezu alle Lebensbereiche durchdrungen: z. B. als Gurtstraffer im Auto, als Inertialsensoren (Beschleunigungs- und Drehsensoren) in mobilen Navigationsgeräten, Smartphones oder Smart Watches, als Bildstabilisatoren in Kameras oder Smartphones, als Spiegel in optischen Projektoren zur Steuerung der Bildpunkte und anderes mehr. Im Anwendungsfall des Fahrzeugs lässt sich der Einsatz von Mikrosystemtechnik sehr anschaulich verfolgen. Vor einigen Jahrzehnten wurden lediglich einige wenige Parameter im Fahrzeug von Sensoren überwacht. Mit der Entwicklung der Mikrosystemtechnik wuchsen die Menge der Sensoren und die Zahl der Aufgaben. Durch ihre vielfältigen Einsatzmöglichkeiten haben die winzigen Chips die Sensorik von Fahrzeugen deutlich verändert. Die Technologie ist die Grundlage für die Entwicklung bzw. Funktion anderer Technologien (wie bspw. MEMS LiDAR, T106) und kann deshalb als Schlüsseltechnologie bzw. *Enabler*-Technologie bezeichnet werden.

Aufgrund der hohen Diversität der Technologien in diesem Modul konnte an dieser Stelle keine aussagekräftige Patentanalyse durchgeführt werden.

¹ Stephanus Büttgenbach, *Mikrosystemtechnik*, Technik im Fokus (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016), <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49773-9>; Wolfgang Menz, „Die Mikrosystemtechnik und ihre Anwendungsgebiete“, *Spektrum der Wissenschaft*, Nr. 2 (1. Februar 1994), <https://www.spektrum.de/magazin/die-mikrosystemtechnik-und-ihre-anwendungsgebiete/821369>; Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Mikrosystemtechnik: maximale Innovationskraft auf minimalem Raum“, 2020, <https://www.innotruck.de/themenwelt/technologien/mikrosystemtechnik/>.