

Wertschöpfungspotenziale von E-Motoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4	4. Wertschöpfungspotenziale elektrischer Antriebsmotoren im automobilen Sektor in Baden-Württemberg	60
Management Summary	6	4.1. Herstellerlandschaft von Antriebsmotoren und (Sub-)Komponenten in Baden-Württemberg	61
1. Ausgangslage und Zielsetzung	10	4.1.1. OEMs und Tier-1-Unternehmen in Baden-Württemberg	64
2. E-Motor-Technologien im elektrifizierten Automobil	12	4.1.2. Tier-2 und Sublieferanten in Baden-Württemberg	66
2.1. Stand der Technik	13	4.1.3. Hersteller- und Kompetenzlandkarte Baden-Württemberg	67
2.1.1. Elektrische Maschinen	13	4.2. Wertschöpfungspotenziale und Beschäftigungseffekte bei der Herstellung elektrischer Antriebsmotoren in Baden-Württemberg	68
2.1.2. Betrachtete Anwendungsgebiete im Rahmen dieses Themenpapiers	19	4.2.1. Wertschöpfungspotenzial in Baden-Württemberg	69
2.1.3. Schnittstellenkomponenten	23	4.2.2. Veränderung der Wertschöpfung durch Trends im Bereich der E-Motoren- und Produktionstechnologie	73
2.2. Produktionsverfahren E-Motoren	25	4.2.3. Aktuelle und zukünftige Beschäftigungssituation in Baden-Württemberg	77
2.2.1. Blechpaket	26	5. Definition einer Standardlieferkette für elektrische Antriebsmotoren in Automobilanwendungen und Implikationen für die Wertschöpfung in Baden-Württemberg	80
2.2.2. Statorproduktion	26	5.1. Standardlieferkette und Produktionsnetzwerk	81
2.2.3. Wellenproduktion	28	5.1.1. Weltweite Produktionsnetzwerke von Traktionsmotoren und deren Subkomponenten im Überblick ...	81
2.2.4. Rotorproduktion	29	5.1.2. Definition eines Standardlieferketten-Szenarios für elektrische Antriebsmotoren	90
2.2.5. Gehäuseproduktion	30	5.1.3. Bewertung des Standorts Deutschland bzw. Baden-Württemberg innerhalb des globalen Produktionsnetzwerks	92
2.2.6. Endmontage	31	5.2. Wertschöpfungspotenziale für Baden-Württemberg	93
2.3. Technologietrends von Traktionsmotoren und deren Subkomponenten	32	5.2.1. Einordnung der Technologiekompetenz und der Marktposition des Standorts Baden-Württemberg	94
2.3.1. Trendanalyse Traktionsmotoren	32	6. Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	100
2.3.2. Implikationen für E-Motoren und Subkomponenten	36	6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse des Themenpapiers	100
2.4. E-Motoren in Nutzfahrzeugen	37	6.2. Handlungsempfehlungen und Potenziale durch E-Motoren für das Land Baden-Württemberg	102
2.4.1. Technologiebewertung E-Motoren in Nutzfahrzeugen	37	Literaturverzeichnis	106
2.4.2. Ableitung von Synergieeffekten zwischen den Marktsegmenten	38	Abbildungsverzeichnis	110
3. Weltweiter Markt für E-Motoren in Automobilanwendungen bis 2030	40	Tabellenverzeichnis	112
3.1. Bedarfe und Marktentwicklungen im automobilen Sektor	41	Abkürzungsverzeichnis	112
3.1.1. Prognose der globalen Fahrzeugneuzulassungen bis 2030	41		
3.1.2. E-Motoren-Bedarfe nach Antriebstopologie und Ausstattungsvariante	47		
3.2. Marktpotenziale für E-Motoren im elektrifizierten Antriebsstrang	52		
3.2.1. Kostenbewertung der relevanten Traktionsmotortechnologien	52		
3.2.2. Globale Marktpotenziale der relevanten E-Motoren	56		
3.2.3. Wertschöpfungsanteile im Rahmen der globalen Marktpotenziale	58		

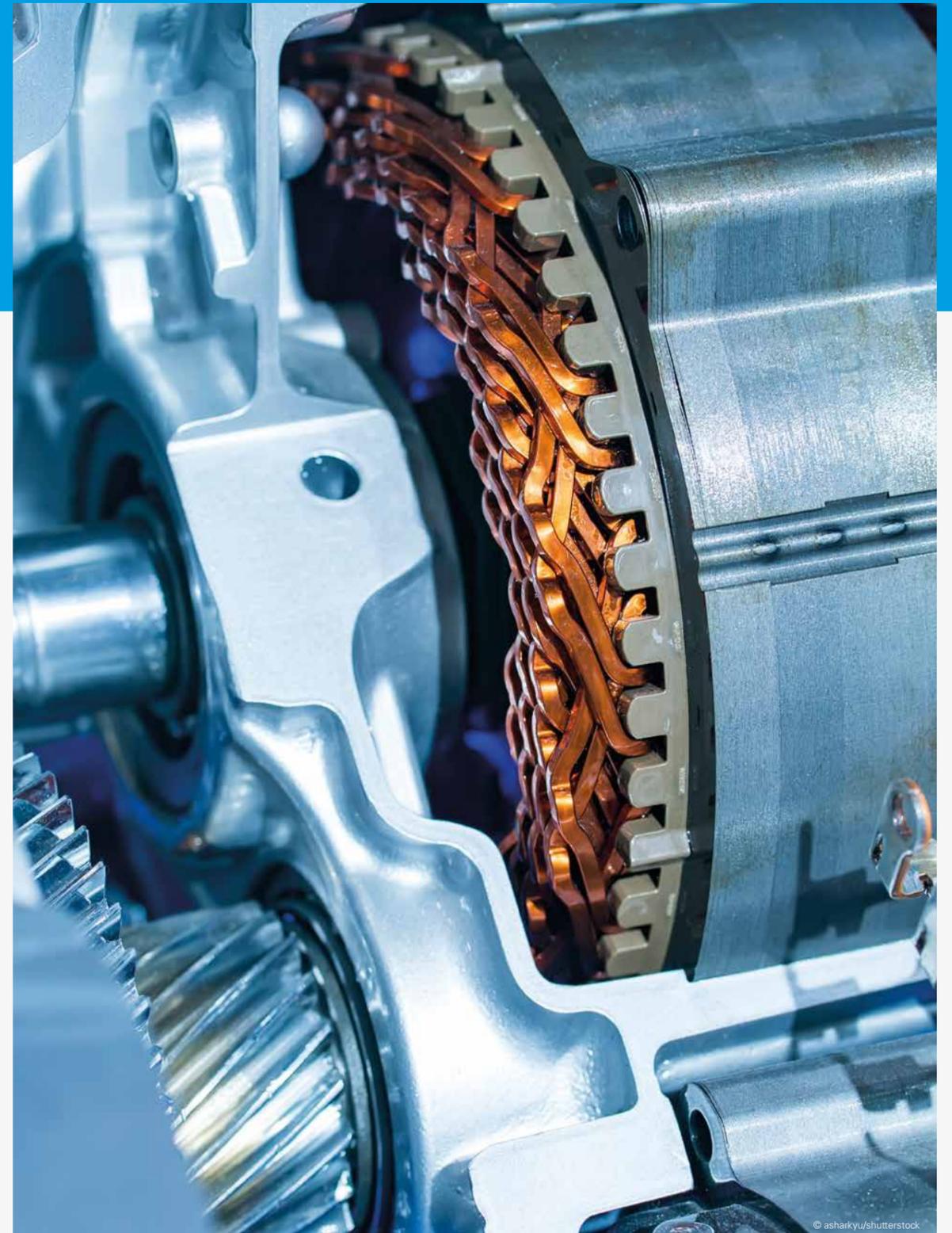
Im aktuellen Transformationsprozess der Automobilbranche ist neben der Digitalisierung der Wechsel zu elektrischen Antrieben ein entscheidender Erfolgsfaktor. Die Elektromobilität ist zukünftig der größte Hebel, um die gesetzten Klimaschutzziele im Verkehrssektor zu erreichen und dem Anspruch einer umweltfreundlichen Mobilität bis zum Jahr 2030 gerecht zu werden. Elektromobilität hat dabei vielfältige Ausprägungsformen – vom batterieelektrischen Fahrzeug über Hybridkonzepte bis hin zu Brennstoffzellenanwendungen.

Diese im Grundsatz ähnlichen Antriebsarten erhöhen die Komplexität der Arbeitsprozesse bei den Fahrzeugherstellern und Zulieferern, nicht nur in der Entwicklung, sondern auch in der Produktion. Beim Umstieg auf alternative Antriebskonzepte fallen diverse bekannte Komponenten rund um den Verbrennungsmotor weg, gleichzeitig bieten vermehrt elektrische und elektronische Komponenten neue Wertschöpfungspotenziale. Dem E-Motor als zentralem Bauteil der Elektromobilität kommt neben der Batterie eine Schlüsselrolle zu, da er bei allen elektrischen Antriebskonzepten benötigt wird, jedoch technisch sehr unterschiedlich ausgelegt und für die jeweilige Anwendung optimiert werden muss. In diesem Wachstumsmarkt ist es von Bedeutung, dass deutsche Automobilkonzerne und Zulieferer ihre Innovationskraft nutzen, um auch bei den neuen Technologien mit spezialisierten Komponenten und überzeugenden Produkten relevante Marktanteile zu erzielen.

Sicher ist: In zukünftigen Fahrzeugen wird die Anzahl an elektrischen Aktuatoren und E-Motoren für den Antrieb und viele weitere Funktionen zunehmen. Diese Marktchancen gilt es, für die baden-württembergische Automobilwirtschaft zu ergreifen und bereits vorhandenes Know-how weiterzuentwickeln.

Daher hat der Cluster Elektromobilität Süd-West eine Analyse der Wertschöpfungspotenziale von E-Motoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg in Auftrag gegeben. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den Wertschöpfungspotenzialen entlang der Herstellungskette. Ziel ist es, Erfolgsfaktoren dafür aufzuzeigen, wie bei den zentralen Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs eine ähnlich starke Marktstellung wie beim Verbrennungsmotor aufgebaut werden kann. Das ist notwendig, um weiterhin als Automobilcluster wettbewerbsfähig zu sein und Wohlstand und Beschäftigung in der Region zu sichern.

Franz Loogen
Geschäftsführer, e-mobil BW GmbH



Management Summary

Der E-Motor ist eine der zentralen Komponenten im elektrifizierten Antriebsstrang und wird sowohl bei batterieelektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen als auch bei Hybridfahrzeugen benötigt. Zudem gibt es weitere vielfältige Anwendungsgebiete für E-Motoren im Fahrzeug. Diese umfassen beispielsweise die elektrische Parkbremse, elektrische Fensterheber und elektrische Klimaanlage. Der elektrische Traktionsmotor im PKW bietet für Baden-Württemberg die größte Chance, Wertschöpfungspotenziale im Transformationsprozess zur Elektromobilität zu erschließen.

Nur wenn es gelingt, in Zukunft bei allen wichtigen Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs ausreichend vertreten zu sein, kann der Südwesten Deutschlands seine Stellung als eines der führenden Automobilcluster in Europa erhalten und zur Sicherung des Wohlstands sowie der Beschäftigung in Baden-Württemberg beitragen.

Das vorliegende Themenpapier beschreibt in zwei Szenarien, wie groß die Wertschöpfungspotenziale bei der Herstellung von E-Motoren für automobiler Anwendungen in Baden-Württemberg sein könnten, wenn es gelingt, das vorhandene gute Basis-Know-how zu nutzen, um in einer sehr international vernetzten, kompetitiven und kostengetriebenen Branche Marktanteile und Wertschöpfungstiefe auszubauen. Acht Handlungsempfehlungen zeigen Wege auf, wie durch die Akteure im Land ein wirtschaftlich funktionierendes „Ökosystem“ zur Produktion von E-Motoren gefördert und aufgebaut werden kann.

1. Förderung von Technologiekompetenz bei der Entwicklung und Produktion elektrischer Traktionsmotoren.
2. Steigerung der Attraktivität Baden-Württembergs als Standort für E-Motoren-Produktion.
3. Befähigung etablierter mittelständischer Unternehmen und Ansiedlung neuer Unternehmen.
4. Beobachtung des Trends zur vertikalen Integration.
5. Realisierung von Wertschöpfungspotenzialen an den Schnittstellen des E-Motors zum Gesamtfahrzeug.
6. Transfer von Know-how aus Erprobung und Validierung

des konventionellen Antriebs auf E-Motoren.

7. Förderung weiterer Wertschöpfungspotenziale im erweiterten Wertschöpfungscluster Maschinen- und Anlagenbau.
8. Analyse weiterer möglicher Wertschöpfungspotenziale bei Rohmaterialien und Halbzeugen.

Die Handlungsempfehlungen fußen auf der Analyse der folgenden Schwerpunkte:

- aktueller technologischer Status der elektrischen Traktionsmotoren, ihrer Komponenten und ihrer Herstellung
- globale und regionale Marktentwicklung
- vorhandene Montage- und Produktionskompetenzen in Baden-Württemberg
- bestehende globale Lieferbeziehungen

Motortopologien:

Der Permanentmagnet-Synchronmotor (PSM) ist heute der am häufigsten eingesetzte elektrische Traktionsmotor und wird aus aktueller Sicht weiter an Bedeutung gewinnen.

Im Bereich elektrischer PKW-Antriebsmotoren haben sich drei Motorentypen etabliert:

1. Permanentmagnet-Synchronmotor (PSM)
2. Drehstrom-Asynchronmotor (ASM)
3. Fremderregte Synchronmotor (FSM)

Unter diesen Antriebsarten erreicht der PSM die größten Marktanteile und höchsten Effizienzen im mittleren Drehzahlbereich. Aufgrund des Bedarfs an seltenen Erden weist er jedoch auch die höchsten Kosten aus. Die Kosten für E-Motoren teilen sich gemittelt über die drei Motorentypen in ca. 70% für Materialkosten inkl. Halbzeugen wie Wickeldraht oder Permanentmagnete und 30% Produktionskosten. Dabei ähneln sich die Produktionsprozesse der verschiedenen Motorentypen stark.

Im Zuge steigender Absatzzahlen elektrisch angetriebener Fahrzeuge (xEV) steht für Fahrzeughersteller und Systemlieferanten die Weiterentwicklung des E-Motors zukünftig verstärkt im Fokus. In den kommenden Jahren sollen vor allem Verbesserungen hinsichtlich der Leistungsparameter, der Effizienzen sowie der Produktions- und Materialkosten erreicht werden. Hierbei sind Technologietrends wie die kontinuierliche Hairpin-Wicklung, erhöhte Drehzahlen, verbesserte Isolationen und die verstärkte Systemintegration von hoher Relevanz.

Marktpotenzial: Elektrische Traktionsmotoren im PKW sorgen 2030 für rund 22 Mrd. € Umsatz weltweit

Aufgrund der weltweiten Regelungen zum Klimaschutz wird in den kommenden Jahren eine starke Marktdurchdringung der Elektromobilität prognostiziert. Es wird bis zum Jahr 2030 ein Anteil von über 80% elektrifizierter Fahrzeuge wie Mild Hybrid Electric Vehicles (MHEV), Hybrid Electric Vehicles (HEV), Plug-in-Hybrid Electric Vehicles (PHEV) und vollelektrischer batteriebetriebener Fahrzeuge (BEV) am globalen PKW-Markt erwartet. Der weltweite Absatz elektrischer Traktionsmotoren wächst auf Basis des in Kapitel 3 beschriebenen Prognosemodells auf ca. 92 Mio. Einheiten (siehe Abbildung 1). Die größten Marktanteile entfallen dabei voraussichtlich auf MHEV-Traktionsmotoren mit ca. 43% Marktanteil, für BEV-Motoren wurde ein Marktanteil von ca. 23% ermittelt. Für elektrische Traktionsmotoren wird ein weltweites Marktpotenzial von ca. 22 Mrd. € für das Jahr 2030 erwartet.

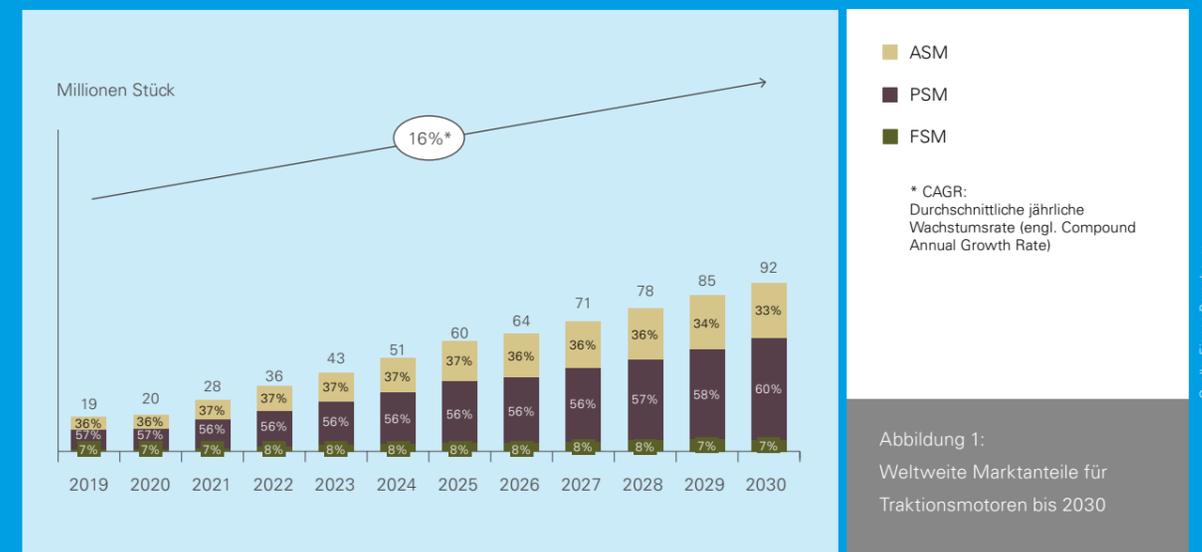


Abbildung 1:
Weltweite Marktanteile für
Traktionsmotoren bis 2030

Kompetenzen: Im Land Baden-Württemberg sind alle erforderlichen Kompetenzen zur Entwicklung und Fertigung von E-Motoren vorhanden

Für Baden-Württemberg ergeben sich durch diese Marktentwicklung hohe Wertschöpfungspotenziale. Um diese Potenziale erschließen zu können, ist jedoch eine intensive und abgestimmte Begleitung sowie Förderung von Wirtschaft und Wissenschaft durch die Politik erforderlich. Aktuell konnten 61 Unternehmen im Land, bestehend aus OEMs und Automobilzulieferern, identifiziert werden, die Kompetenzen zur Produktion von E-Motoren und ihrer (Sub-)Komponenten in integrierten Fertigungsschritten aufweisen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass alle zur Herstellung von E-Motoren benötigten Kompetenzen grundsätzlich im Land vorhanden sind. Die Analyse umfasst dabei keine Wertschöpfung in der Herstellung von Halbzeugen und Rohmaterialien.

Ein **Best-Case-Szenario** berechnet bis zum Jahr 2030 auf Basis der in diesem Themenpapier beschriebenen Prämissen eine Steigerung des Wertschöpfungspotenzials von 25 Mio. € auf 113 Mio. € für das Land Baden-Württemberg (siehe Kapitel 4).

Während das Best-Case-Szenario von einer vollständigen Fertigung der E-Motoren inklusive der (Sub-)Komponenten ohne Materialien und Halbzeuge im Land ausgeht, berücksichtigt das **Realistic-Case-Szenario** die bestehenden weltweiten Lieferkettenstrukturen. Bei diesem Szenario wird von einer geringeren Wertschöpfungstiefe ausgegangen, da bereits heute viele (Sub-)Komponenten außerhalb von Baden-Württemberg zugekauft werden und dies auch in der Zukunft so bleiben könnte.

Das Realistic-Case-Szenario zeigt eine Steigerung des Wertschöpfungspotenzials von (heute) ca. 16 Mio. € auf über 80 Mio. € im Jahr 2030. Die Potenziale liegen im Realistic-Case-Szenario bei gleichbleibender Absatzstückzahl ca. 20–40% unter der Entwicklung des Best-Case-Szenarios.

Wertschöpfung: Erhöhung der Fertigungstiefe in der Produktion der Fahrzeughersteller angekündigt

Die Analyse der Strategien und Ankündigungen von im Land ansässigen Fahrzeugherstellern und Systemlieferanten zeigt, dass sowohl die E-Motoren-Entwicklung als auch die Erprobung und Fertigung derzeit hauptsächlich bei den Zulieferern wie der Robert Bosch GmbH, der ZF Friedrichshafen AG, der Schaeffler Gruppe oder der Mahle GmbH stattfinden. In-

folge der steigenden Marktdurchdringung elektrifizierter Antriebe rückt die E-Motoren-Entwicklung und -Fertigung jedoch zunehmend in den Fokus der Fahrzeughersteller. Dies lässt auf eine zunehmende Erhöhung der Fertigungstiefe in den nächsten Jahren schließen. Diese Integration wurde bereits von diversen OEMs angekündigt.

Der Großteil der globalen Fahrzeughersteller beteiligt sich zukünftig an der Produktion von elektrischen Traktionsmotoren und verfolgt dabei eine Strategie der teilweisen Inhouseproduktion. Die wichtigsten E-Motoren-Komponenten für die volumenstärksten Plattformen werden voraussichtlich selbst produziert und Subkomponenten werden teilweise zugekauft. Tier-1-Lieferanten übernehmen daraufhin voraussichtlich die Produktion von E-Motoren für OEMs ohne Inhousefertigung, bieten Produktlösungen für die nicht durch OEMs abgedeckten Anwendungsfelder und für neue Märkte wie Nutzfahrzeuge an.

Beschäftigung: E-Motoren-Produktion ermöglicht positive Beschäftigungseffekte in Baden-Württemberg

Durch den steigenden Bedarf an elektrischen Traktionsmotoren weltweit und die in den Szenarien aufgezeigten Wertschöpfungspotenziale für Baden-Württemberg können auch neue Arbeitsplätze im Bereich der E-Motoren-Produktion im Land entstehen. Für das Best-Case-Szenario ergab die Berechnung für die hinzukommenden (Fade-in-) Beschäftigungseffekte ein Plus von etwa 2.000 Mitarbeitenden für das Jahr 2030. Von den 2.000 ausgewiesenen Mitarbeitenden könnten voraussichtlich ca. 1.250 Mitarbeitenden auf die Produktion entfallen und ca. 750 Mitarbeitende in den indirekten Bereichen beschäftigt sein. Im Rahmen des Realistic-Case-Szenarios, das internationale Lieferketten berücksichtigt und von einer geringeren Wertschöpfungstiefe ausgeht, reduzieren sich diese Beschäftigungseffekte auf etwa 1.670 Mitarbeitende.

Für nachfolgende Berechnungen des europaweiten Wertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs im Produktcluster der elektrischen Antriebsmotoren werden 8% als konstanter Wert verwendet. Die Ableitung erfolgte auf Basis der Strukturstudie BW[®] mobil 2019. Im Rahmen der Strukturstudie wurde für das Basisjahr 2019 ein Anteil Baden-Württembergs von 3–5% an der europaweiten Wertschöpfung im Bereich „neuer Komponenten“ ermittelt, darunter Batteriesysteme, Leistungselektronik und elektrische Motoren aller Leistungsklassen. Der angenommene Wert für E-Motoren

wurde vom Konsortium aufgrund der folgenden Argumente festgesetzt.

1. Ein erhöhtes technisches Differenzierungspotenzial im Produktfeld elektrischer Antriebsmotoren gegenüber handelsüblichen E-Motoren-Varianten (Fensterheber, Sitzsteller, Kleinstmotoren ...)
2. Die Ansässigkeit bereits etablierter Unternehmen im Bereich elektrischer Antriebsmotoren wie Porsche AG, Robert Bosch GmbH, ZF Friedrichshafen AG, Schaeffler AG, Mahle GmbH etc. in Baden-Württemberg
3. Die im direkten Vergleich bereits fortgeschrittenere Integration Baden-Württembergs im Bereich E-Motoren gegenüber den Produktclustern Lithium-Ionen-Batterie und Leistungselektronik

Die Autoren des Themenpapiers nehmen an, dass der Wertschöpfungsanteil Baden-Württembergs in Höhe von 8% am europäischen Markt bis 2030 konstant bleibt. Gründe hierfür liegen trotz des prognostizierten starken Marktwachstums im Produktcluster elektrischer Antriebssysteme bis zum Jahr 2030 im globalen Sourcing und Wettbewerb insbesondere mit Asien.

Die realen Entwicklungszahlen müssen entsprechend den in Baden-Württemberg getätigten Investitionen und der Firmenaufstellung gemonitort werden, um entlang der Transformation aktuelle Aussagen zum realen Marktanteil treffen zu können.

Lieferantenbeziehungen: Während OEMs eher regionale Beziehungen aufbauen, setzen Systemlieferanten auf globale Netzwerke

Die Analyse des globalen E-Motoren-Marktes für das Jahr 2025 zeigt, dass sowohl OEMs als auch Tier-1-Automobilzulieferer aus Europa, Asien und Nordamerika zu den Unternehmen mit den größten Marktanteilen zählen werden. Eine Untersuchung der europäischen Produktionsnetzwerke von Verbrennungsmotoren im Rahmen der Strukturstudie BW[®] mobil 2019 ergab, dass die Fahrzeughersteller tendenziell stärker regional für den jeweiligen Markt produzieren und auch ihre Lieferantenbeziehungen regionaler aufbauen als Systemlieferanten. Letztere setzen stärker auf einen Einkauf der Komponenten außerhalb des Landes.

1.

Ausgangslage und Zielsetzung

Für die Bewertung der Wertschöpfung durch die Herstellung von E-Motoren in Baden-Württemberg ist ein tiefgreifendes Verständnis der aktuellen E-Motoren-Designs ebenso wichtig wie ein Einblick in die weltweiten Volumina im Betrachtungszeitraum bis 2030. Diese werden auf Basis prognostizierter Fahrzeughochläufe, angekündigter Produkt-Roadmaps sowie aktuell und voraussichtlich in Zukunft abgedeckter Wertschöpfungsstufen durch Unternehmen in Baden-Württemberg abgeleitet.

Das vorliegende Themenpapier liefert Antworten auf folgende Fragestellungen:

- Welche Motorkonzepte gibt es, wie werden die Motoren gefertigt und wo werden sie eingesetzt?
- Welche Technologietrends gibt es für E-Motoren und deren Subkomponenten?
- Welche Synergieeffekte ergeben sich aus dem Bereich der Traktionsmotoren für Nutzfahrzeuge?
- Wie entwickelt sich der weltweite Markt für E-Motoren in Automobilanwendungen und welche Bedarfe sind im Zuge der Elektrifizierung zu erwarten?
- Welche Wertschöpfungskompetenz und -stärken haben die Unternehmen in Baden-Württemberg?
- Welche zukünftig attraktiven Wertschöpfungsstufen ergeben sich daraus für die Unternehmen in Baden-Württemberg?
- Welche Beschäftigungseffekte und -potenziale lassen sich entlang der Wertschöpfungskette identifizieren und für die Unternehmen in Baden-Württemberg ableiten?

Kapitel 2 beleuchtet den Stand der Technik, die Entwicklung der Motorkonzepte sowie die Subkomponenten der E-Motoren im Fahrzeug. Zusätzlich zur Beschreibung der E-Motoren-Typen werden das Zusammenspiel im Antriebsstrang und die zugehörigen Schnittstellenkomponenten aufgezeigt. Neben den im Fokus des Themenpapiers befindlichen Traktionsmotoren wird durch die Elektromobilität auch die Elektrifizierung von Leistungs- und Nebenverbrauchern weiter beschleunigt. Effizienzsteigerungen und verbesserte Steuerungsfähigkeit von elektrischen Motorsystemen treiben die Entwicklung weg von riemengetriebenen Applikationen und eröffnen weitere Wertschöpfungspotenziale. Für die Identifikation von Synergieeffekten beinhaltet das zweite Kapitel zudem einen Exkurs zu E-Motoren in Nutzfahrzeugen.

In **Kapitel 3** werden der weltweite E-Motoren-Markt für Automobilanwendungen sowie dessen Entwicklung bis 2030 analysiert. Infolge der steigenden Anzahl elektrischer Motoren – getrieben durch die Elektrifizierung von Antriebstopologien und durch die steigenden Durchdringung von Premiumfahrzeugen mit erweiterten Komfortfunktionen – verlagern sich die Marktpotenziale weltweit. Ein klares Verständnis über den Bedarf und die Profitabilität dieser Systeme und im Speziellen über elektrische Antriebsmotoren wird in diesem Kapitel erarbeitet, um strategische Implikationen für lokale Industrien entsprechend einordnen und nutzen zu können.

Kapitel 4 befasst sich mit den Wertschöpfungspotenzialen von Unternehmen in Baden-Württemberg. Der Fokus liegt hierbei auf den elektrischen Traktionsmotoren für automobiler Anwendungen. Aufbauend auf der Strukturstudie BW^e mobil 2019 und einer Auswertung der E-Motoren-Produktions- und -Montagekompetenzen werden die abgedeckten Wertschöpfungsstufen in Baden-Württemberg herausgearbeitet. Als Basis hierfür dienen die in Kapitel 3 ermittelten

Fahrzeug- und Markthochläufe sowie die Analysen der weltweiten Marktpotenziale im Bereich E-Motoren und der abgedeckten Wertschöpfungsstufen in Baden-Württembergs. Aufbauend auf den Ergebnissen des Kapitels werden die Wertschöpfungspotenziale und die Beschäftigungssituation in Baden-Württemberg in der Produktion und Montage elektrischer Traktionsmotoren für PKW-Anwendungen im Rahmen eines Best-Case-Szenarios prognostiziert. Ziel des Kapitels ist die Darstellung der aktuellen und zukünftigen Wertschöpfung sowie der Beschäftigung in der Herstellung von elektrischen Traktionsmotoren in Baden-Württemberg unter optimalen Bedingungen.

Kapitel 5 gibt einen Überblick über die globalen Lieferbeziehungen für E-Motoren und deren (Sub-)Komponenten. Dies dient als Grundlage für die Darstellung der an der Produktion von E-Motoren beteiligten Länder bzw. Regionen. Anhand dieser Übersicht wird die Platzierung deutscher und insbesondere baden-württembergischer Unternehmen bei der Herstellung von elektrischen Traktionsmotoren verdeutlicht und eine potenzielle Entwicklung bis zum Jahr 2025 aufgezeigt. Auf Basis der Marktsituation sowie der Lieferbeziehungen wird eine Standardlieferkette für das Jahr 2025 abgeleitet.

Anschließend werden im Rahmen einer zusammenfassenden Betrachtung die bisherigen Ergebnisse des Themenpapiers ausgewertet und auf die Standardlieferkette bezogen. Daraus leitet sich nach Gegenüberstellung mit dem im Themenpapier evaluierten Marktpotenzial für Baden-Württemberg das Realistic-Case-Szenario ab.

In **Kapitel 6** werden abschließend die Ergebnisse der Kapitel 1 bis 5 zusammengefasst und daraus die Entwicklungspotenziale und Handlungsempfehlungen für die Akteure in Baden-Württemberg abgeleitet.

2.

E-Motor-Technologien im elektrifizierten Automobil

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs im Automobil hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Grund hierfür sind, neben den zunehmend strengeren Regularien wie den von der EU beschlossenen CO₂-Grenzwerten, vor allem Technologiesprünge, die einen elektrifizierten Antrieb gegenüber Verbrennungsmotoren wettbewerbsfähig machen. Bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen werden jedoch auch außerhalb des Antriebsstrangs zusätzliche elektrische Motoren für verschiedene Anwendungen verbaut. Zudem können durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ehemals riemengetriebene Funktionen durch elektrische Antriebe ersetzt werden. Um konkrete Implikationen für die Wertschöpfung und die damit im Zusammenhang stehende Industrie ableiten zu können, werden in diesem Kapitel deshalb neben den Traktionsmotoren auch diese zusätzlich verbauten E-Motoren und deren Technologien betrachtet.

■ Im Bereich der elektrischen PKW-Antriebe werden hauptsächlich die **Motorentypen Permanentmagnet-Synchronmotor (PSM), Drehstrom-Asynchronmotor (ASM) und Fremderregter Synchronmotor (FSM)** eingesetzt. Der PSM ist dabei heute der am häufigsten eingesetzte elektrische Traktionsmotor und wird aus aktueller Sicht weiter an Bedeutung gewinnen.

■ Die **Produktionsprozesse der verschiedenen Motortypen sind sehr ähnlich** und teilen sich auf die Komponenten Rotor, Stator und Gehäuse mit ihren Subkomponenten sowie die Endmontage auf. Die größte Abweichung in der E-Motoren-

Produktion ist beim PSM durch den Einsatz von Permanentmagneten, für deren Rotoren in der Produktion seltene Erden benötigt werden, im Gegensatz zum FSM und ASM festzustellen.

■ Durch die steigende Bedeutung der Elektrifizierung der Mobilität rückt der E-Motor verstärkt in den Fokus der Forschung und Entwicklung der Fahrzeughersteller, Systemlieferanten und wissenschaftlichen Einrichtungen. Im Mittelpunkt steht dabei die Optimierung hinsichtlich Effizienz, Leistung und Kosten.

■ Im Rahmen dieser Forschung zeichnen sich mehrere Trends zur Verbesserung der marktdominierenden Motorenarten **wie höhere Drehzahlen, verbesserte Isolierungen oder auch die verstärkte Systemintegration** ab.

■ Neben den Trends zur Verbesserung der aktuell am Markt vorherrschenden Motortopologien werden auch weitere Motorenarten wie beispielsweise der Axialflussmotor für eine zukünftige Anwendung als PKW-Traktionsmotor perspektivisch absehbar.

■ Neben den E-Motoren für PKW gewinnt der **Markt für elektrische Traktionsmotoren in Nutzfahrzeugen** weiter an Bedeutung. Dabei ergeben sich aktuell vor allem Synergieeffekte zu den leichten Nutzfahrzeugen, da diese auf E-Motoren aus dem PKW zurückgreifen bzw. sehr ähnliche Anforderungen haben

2.1. Stand der Technik

Die in der Automobilindustrie angewendeten Technologien für E-Motoren finden auch in verschiedenen anderen Anwendungsbereichen, wie Haushaltsgeräten und der Industrie, vielseitige Anwendung. Jedoch weichen die Anforderungen hinsichtlich Effizienz, Zuverlässigkeit und Leistungsdichte im Fahrzeugbau teilweise deutlich von den anderen Anwendungsfällen ab. Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die aktuell im Fahrzeugbau marktrelevanten E-Motoren und deren Eigenschaften geben und technisches Verständnis vermitteln.

2.1.1. Elektrische Maschinen

Elektrische Maschinen sind Energiewandler, die als Motor elektrische in mechanische Energie und als Generator mechanische in elektrische Energie wandeln. Sie lassen sich anhand des Spannungsverlaufs in Gleichstrom- (DC) und Wechselstrommotoren (AC) unterscheiden. Abbildung 2 zeigt die in der Elektromobilität relevanten E-Motoren (Kampker, et al., 2013). Aufgrund des weit verbreiteten Gebrauchs der Begriffe E-Motor und E-Maschine werden diese als Synonyme für den Begriff elektrische Maschine verwendet (Binder, 2012). Im Rahmen des vorliegenden Themenpapiers wird der Begriff E-Motor verwendet.

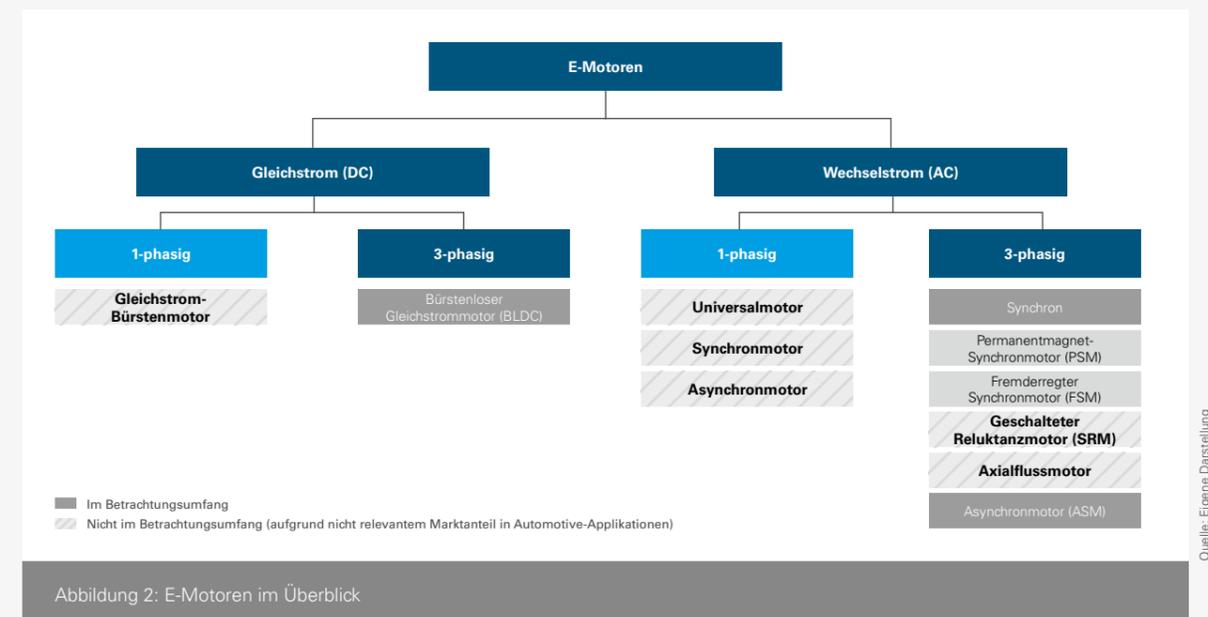
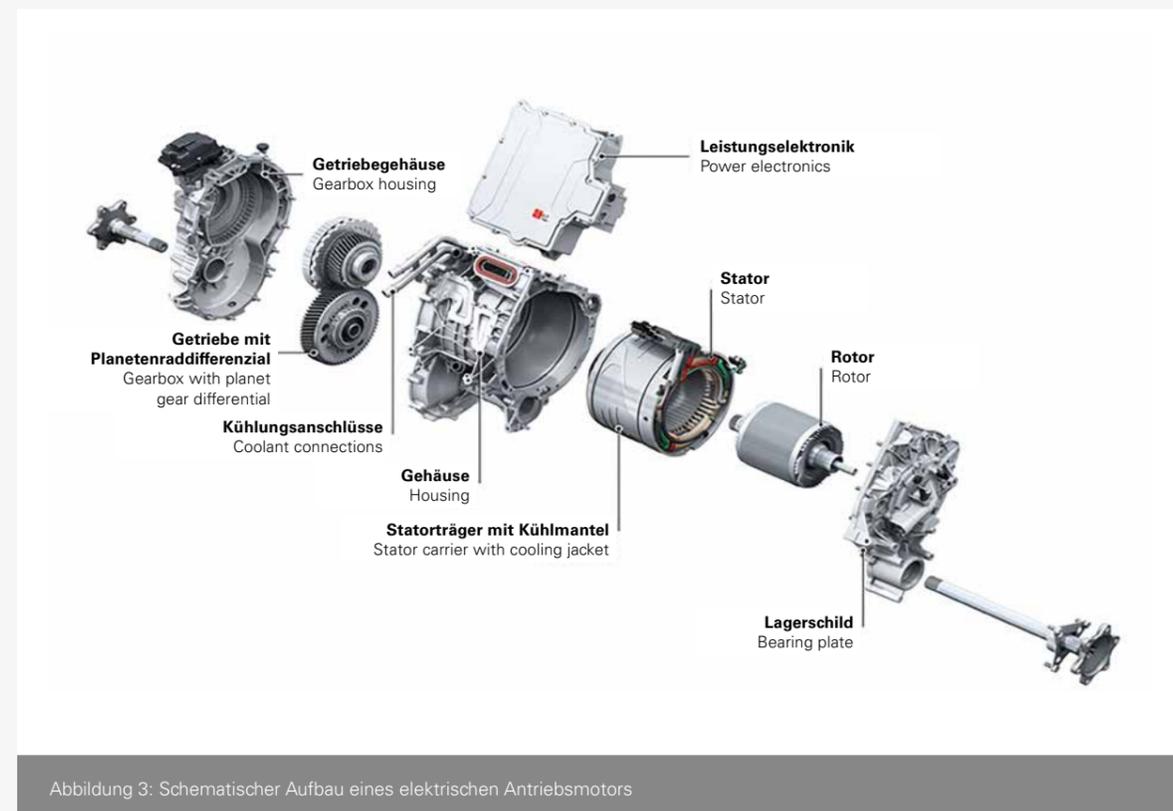


Abbildung 2: E-Motoren im Überblick

Quelle: Eigene Darstellung

Gleich- und Wechselstrom-E-Motoren liegen unterschiedliche Konzepte hinsichtlich des Eingangsstroms und der Verschaltung der Spulenwicklungen zugrunde. Während bei einphasigen Motoren die Spulen über zwei Klemmen (eine Phase) mit Gleich- oder Wechselstrom versorgt werden, geschieht dies bei dreiphasigen Motoren über drei Klemmen, sodass drei um 120° versetzte Spulenpaare zeitversetzt bestromt werden. Weit verbreitete Auslegungen von einphasigen E-Motoren sind Bürstenmotoren, die z. B. direkt über eine Batterie gespeist werden, und Universalmotoren, die über das 230-V-Netz der Haushaltssteckdose versorgt werden. Dreiphasige E-Motoren sind beispielsweise Asynchronmotoren, die in den meisten Industrieanwendungen direkt mit dem 400-V-Drehstrom aus dem Niederspannungsnetz gespeist werden. Im PKW werden bei Traktionsmotoren (Motoren, mit denen der Radsatz eines Fahrzeugs angetrieben wird) dreiphasige Ausführungen verwendet, wohingegen bei sonstigen Anwendungen im Fahrzeug sowohl ein- als auch dreiphasige E-Motoren Einsatz finden.

Hinsichtlich des Aufbaus bestehen die in Abbildung 2 dargestellten E-Motoren aus einem feststehenden Stator und einem sich drehenden Rotor (siehe Abbildung 3). Beide Bauteile wandeln elektrische in mechanische Energie und werden als Aktivteile bezeichnet. Die erzeugten Kräfte führen zu einer Relativbewegung. Der Rotor ist fest mit der Welle verbunden, die das Drehmoment an das Getriebe überträgt. Das Gehäuse ist fest mit dem Stator verbunden und beinhaltet die Lagersitze für die Welle. Welle und Gehäuse gehören zu den Passivteilen. Je nach Motorkonzept sind die Komponenten zum Teil sehr unterschiedlich ausgeführt und werden in Innenläufer- und Außenläufermotoren (z. B. Radnabenmotor) aufgeteilt. Bei Innenläufern befindet sich der Rotor innerhalb und bei Außenläufermotoren außerhalb des Stators. Die Bauform des Außenläufermotors wird im Rahmen dieses Themenpapiers jedoch nicht weiter betrachtet, da diese derzeit keine signifikante Marktrelevanz im Bereich der PKW aufweist.



Quelle: Audi AG

Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines elektrischen Antriebsmotors

Aktuell sind als Traktionsmotoren Permanentmagnet-Synchronmotoren (PSM), Drehstrom-Asynchronmotoren (ASM) und Fremderregte Synchronmotoren (FSM) marktrelevant und finden in elektrisierten Fahrzeugen Anwendung.

Als weitere Motortypen werden der geschaltete Reluktanzmotor (Switched Reluctance Motor, Abk. SRM) sowie der Axialflussmotor als vielversprechende Technologie für Traktionsmotoren angesehen. Jedoch wird für den SRM im betrachteten Zeitraum keine signifikante Marktrelevanz erwartet, weshalb er in diesem Themenpapier nicht weiter betrachtet wird.

Neben den oben genannten Traktionsmotoren für den Antrieb der Fahrzeuge ist es für den Fahrbetrieb notwendig, weitere Funktionen durch E-Motoren zu elektrifizieren. Zum Einsatz kommen hier meist bürstenlose Gleichstrommotoren (Brushless DC, Abk. BLDC). So werden die ehemals riemengetriebenen Verbraucher wie Klimakompressoren oder Servolenkungen nun durch E-Motoren angetrieben. Doch auch bei aktuellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden diese Funktionen teilweise elektrifiziert, um den Kraftstoffverbrauch zu senken. Aufgrund der hohen Leistungs-, Effizienz- und Qualitätsanforderungen kommen für diese Applikationen keine Bürstenmotoren (engl. Brushed DC) zum Einsatz. Diese finden lediglich bei Komfortfunktionen oder Funktionen mit geringer Nutzungsdauer Anwendung.

Wechselstrommotoren mit aktueller Anwendung als Traktionsmotor im PKW

Permanentmagnet-Synchronmotor (PSM)

Das physikalische Grundprinzip hinter der Energiewandlung beim PSM ebenso wie bei FSM und ASM ist die Lorentzkraft. Dabei wird das Drehmoment durch die Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters sowie einem magnetischen Feld der Permanentmagnete erzeugt (Leidhold, 2012). Der PSM besitzt für die Erzeugung der Magnetfelder Spulenwicklungen im Stator und Permanentmagnete im Rotor (siehe Abbildung 4). Die Spulenwicklungen werden über eine dreiphasige Wechselspannung so angeregt, dass sich das durch die Spulen induzierte Magnetfeld in einer definierten Frequenz dreht. Der Rotor folgt dem Magnetfeld des Stators synchron mit der identischen Drehzahl (Reif, et al., 2012).

Aus technischer Perspektive zeichnet sich der PSM unter Teillast und bei niedrigen Drehzahlen durch hohe Effizienzzraten von bis zu 95% aus. Durch diese Eigenschaft erreicht der PSM sehr gute Verbrauchswerte im Homologationszyklus Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC). Bei hohen Drehzahlen sinkt jedoch die Effizienz. Durch den Einsatz starker Permanentmagnete erreicht der PSM eine hohe volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte. Die Betriebstemperatur ist beim PSM auf den materialspezifischen Curie-Punkt der Magnete begrenzt. Oberhalb dieser Temperatur verliert der Rotor seine magnetischen Eigenschaften. Dazu sind Verfügbarkeit und Kosten der benötigten seltenen Erden Neodym und Dysprosium für die Rotormagnete kritisch zu betrachten. Eine weitere Herausforderung beim PSM sind die hohen Schleppverluste, die verstärkt bei Allradfahrzeugen in effizienten Betriebsmodi auftreten, in denen ein Motor temporär abgeschaltet wird.

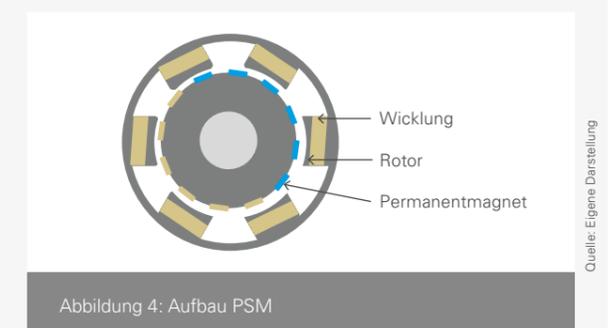


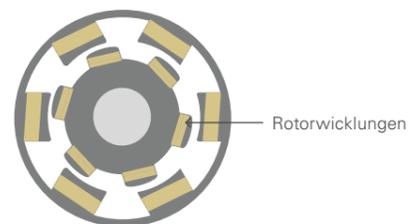
Abbildung 4: Aufbau PSM

Quelle: Eigene Darstellung

Fremderregter Synchronmotor (FSM)

Die Funktionsweise des FSM ist der des PSM sehr ähnlich, allerdings wird das Magnetfeld im Rotor nicht mit Permanentmagneten, sondern mit einer stromdurchflossenen Spulenwicklung erzeugt (siehe Abbildung 5). In aktuellen Serienanwendungen erfolgt die Stromübertragung an die Rotorwindungen mithilfe von Schleifkontakten, die einem natürlichen Verschleiß unterliegen. Nach dem aktuellen Stand der Forschung kann der Strom für das Rotormagnetfeld allerdings auch induktiv und damit völlig berührungslos übertragen werden (siehe Kapitel 2.3). Da das Rotormagnetfeld gezielt angesteuert werden kann, werden sehr gute Laufeigenschaften erreicht.

Der FSM zeichnet sich gegenüber dem PSM durch eine nur minimal geringere Effizienz von bis zu 93% Wirkungsgrad aus. Dies ermöglicht auch mit dem FSM sehr gute Verbrauchswerte im genormten Fahrzyklus WLTC. Die Effizienz kann durch eine induktive Stromversorgung des Rotors anstelle mit Schleifringen und Bürsten noch leicht gesteigert werden. Im Gegensatz zum PSM hat der FSM jedoch aufgrund der Rotorwicklung eine geringere volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte. Aus Materialseite hat der FSM den Vorteil, dass keine teuren seltenen Erden wie Neodym und Dysprosium für die Magnete zur Herstellung des Rotors benötigt werden. Allerdings verursacht das komplexe Rotordesign höhere Kosten in der Produktion.

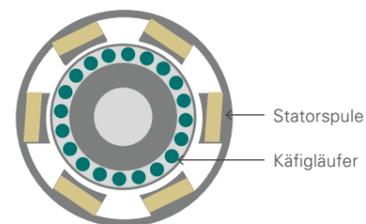


Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5: Aufbau FSM

Asynchronmotor (ASM)

Der ASM zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau und eine kostengünstigere Herstellung im Vergleich zu PSM und FSM aus. Für den Aufbau des Rotors existieren die Alternativen Käfigläufer und Schleifringläufer, wobei Letzterer in der Elektromobilität keine Anwendung findet (siehe Abbildung 6). Der Käfigläufer besteht aus mehreren Aluminium- oder Kupferstäben, die über einen Kurzschlussring zu einem Kurzschlusskäfig verbunden werden. Entsprechend werden für den Rotor keine seltenen Erden benötigt. Der Aufbau des Stators ist dem der oben beschriebenen Synchronmotoren gleich. Im Betrieb wird durch das Statormagnetfeld ein Stromfluss im Kurzschlusskäfig erzeugt, wodurch das zweite Magnetfeld im Rotor entsteht. Der Rotor folgt dem Magnetfeld des Stators, allerdings mit leichter Verzögerung. Die relative Geschwindigkeit zwischen Rotor und Stator wird als Schlupf bezeichnet und ist für die Drehmomentübertragung notwendig. Der Wirkungsgrad ist mit maximal 90% im Vergleich zu Synchronmaschinen etwas geringer. Bei höheren Drehzahlen erreicht der ASM jedoch eine bessere Effizienz (Fleischer, et al., 2017), (Kampker, 2014), (Illiano, 2013). Hinsichtlich der volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte liegt der ASM ebenfalls hinter den Synchronmaschinen, allerdings sind höhere Betriebstemperaturen möglich – und diese erfordern keine aufwendige Kühlung wie beim PSM.



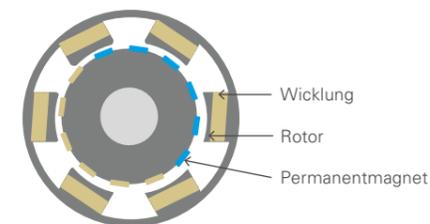
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 6: Aufbau ASM

Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC)

BLDC-Motoren werden lediglich im kleinen und mittleren Leistungssegment eingesetzt und finden keine marktrelevante Anwendung als Traktionsmotoren im PKW-Bereich. Im Gegensatz zu einem Gleichstrom-Bürstenmotor haben BLDC-Motoren keine Kohlebürsten und kein Bürstenfeuer, das die Ansterelektronik stören könnte. Der Aufbau eines BLDC-Motors ist dem eines PSM sehr ähnlich und unterscheidet sich nur durch eine vereinfachte Sensorik. Er verfügt ebenfalls über einen Rotor mit Permanentmagneten und einen mit Spulen umfassten Stator (siehe Abbildung 7). Obwohl die meisten BLDC-Motoren Innenläufer sind, gibt es auch Außenläufer-Konzepte.

BLDC-Motoren weisen im Gegensatz zu konventionellen Gleichstrom-Bürstenmotoren eine höhere Effizienz und Leistungsdichte sowie eine höhere Laufruhe auf. Daher werden für die bisher direkt vom Verbrennungsmotor angetriebenen Verbraucher mit einem hohen Nutzungsgrad, wie beispielsweise Klimakompressoren, größtenteils BLDC-Motoren in elektrischen Fahrzeugen eingesetzt. Jedoch werden bei Herstellung des Rotors genau wie beim PSM seltene Erden benötigt und die Steuerung erfordert eine zusätzliche Leistungselektronik, wodurch aus Kostensicht der BLDC Nachteile gegenüber dem Gleichstrom-Bürstenmotor aufweist. Der Gleichstrom-Bürstenmotor ist dagegen durch eine einfache bzw. keine Steuerung gekennzeichnet und wird daher vor allem für Komfortfunktionen, wie beispielsweise elektrische Fensterheber, eingesetzt. Das Drehmoment lässt sich proportional zum Strom regeln, wobei die Drehzahl proportional zur Spannung variiert. Ein einfacher Aufbau sowie eine geringe Anzahl an zusätzlich notwendigen externen Bauteilen ermöglichen geringe Herstellungs- und Materialkosten. Allerdings erfordert der Verschleiß der Kohlebürsten, die den notwendigen elektrischen Kontakt zum Rotor ermöglichen, regelmäßige Wartungen.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7: Aufbau BLDC

Vergleich der Motorkonzepte

Jedes der aufgeführten Motorkonzepte weist je nach Anwendungsgebiet und Untersuchungskriterium Vorteile bzw. Nachteile gegenüber den anderen Motorkonzepten auf. Ein Blick auf den aktuellen Markt für Elektroautos zeigt, dass PSM, FSM und ASM die vorherrschenden Konzepte sind (siehe Tabelle 1). In Abbildung 8 werden diese drei Motorkonzepte auf Basis der oben beschriebenen Kriterien verglichen. Der Einsatz von geschalteten Reluktanzmaschinen (SRM) wird im Rahmen dieses Themenpapiers nicht genauer beleuchtet, da dieser Motortyp sich gegenwärtig für Elektrofahrzeuge im Forschungsstadium befindet. SRM ermöglichen eine hohe Effizienz ohne den Einsatz von seltenen Erden, jedoch ist die Steuerung des Motors sehr komplex (Fleischer, et al., 2017). Der Axialflussmotor befindet sich derzeit wie die geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) im Entwicklungsstadium, allerdings wird mit einem ersten Einsatz der Technologie bereits ab dem Jahr 2025 in Sonderanwendungen gerechnet. Diese E-Motoren-Bauart wird in Kapitel 2.3.1 als E-Motoren-Trend genauer beleuchtet und bietet aufgrund des hohen potenziellen Drehmoments im Vergleich zur Motorgröße sowie des geringeren Einsatzes von Permanentmagneten im Vergleich zum PSM Potenzial. Ein Vergleich der Motorkonzepte hinsichtlich marktrelevanter Kriterien aus Hersteller- und Kundensicht favorisiert den PSM. Da die Kosten des PSM allerdings stark vom Rohstoffpreis der Permanentmagnete abhängen, können sie sich bei veränderter Marktlage durchaus als unwirtschaftlich herausstellen. Der FSM bietet derzeit gegenüber dem PSM eine geringere Leistungsdichte, besitzt jedoch noch Entwicklungspotenzial (Kampker, 2014). Die Entscheidung für eine Technologie kann stark vom Einsatzgebiet abhängen. Beispielsweise ist der Gesamtwirkungsgrad eines PSM gegenüber dem eines ASM höher. Dieser Vorteil reduziert sich jedoch bei Vollast und hohen Drehzahlen deutlich. Die Stärken des PSM kommen vor allem im Teillastbereich zum Tragen (Binder & Knopik, 2010), (Burkert, 2014).

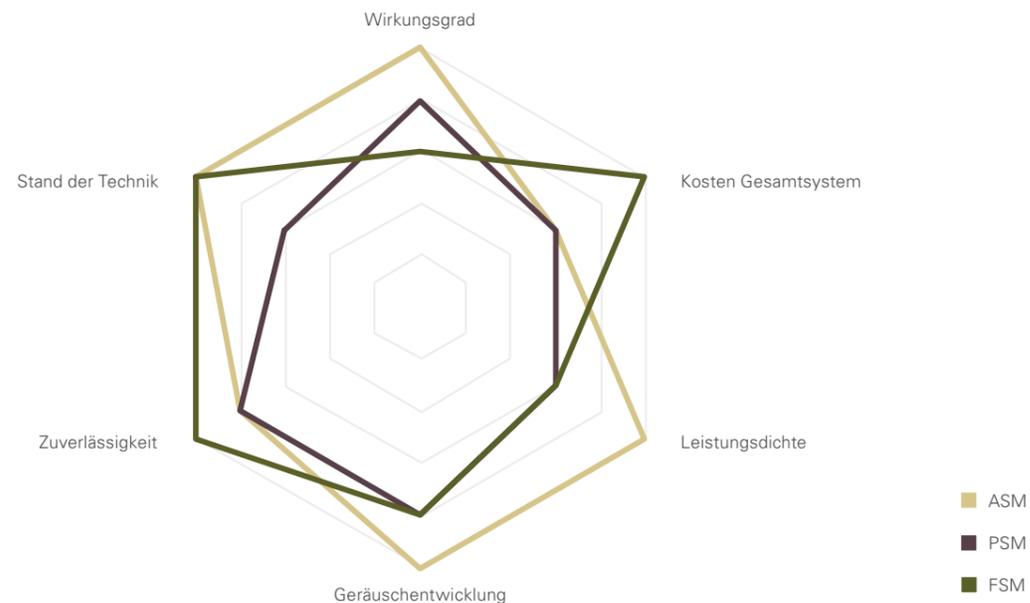


Abbildung 8: Vergleich der Motorkonzepte

Quelle: Eigene Darstellung

Quelle: Eigene Darstellung

Art	Vorteile	Nachteile	Fahrzeugbeispiele
PSM	<ul style="list-style-type: none"> Hohe volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte Hohe Effizienz durch Hochleistungsmagnete 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Materialkosten durch Einsatz seltener Erden in Permanentmagneten 	<ul style="list-style-type: none"> Porsche Taycan, Smart EQ fortwo, VW ID.3, BMW i3, Tesla Model 3, Nissan Leaf, Toyota Prius, Hyundai IONIQ, Jaguar I-Pace
FSM	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Materialkosten 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Fertigungskosten aufgrund von komplexem Rotordesign 	<ul style="list-style-type: none"> Smart EQ forfour, BMW iX3, Renault ZOE
ASM	<ul style="list-style-type: none"> Einfaches Design Guter Wirkungsgrad im Vollastbetrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Materialkosten durch Kupfer für gesteigerte Effizienz 	<ul style="list-style-type: none"> Mercedes-Benz EQC, Audi e-Tron, Tesla Model S, Model X, Model 3 (nur Vorderachse bei 4WD Variante)

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Motorkonzepte mit Fahrzeugbeispielen

Die drei hier beschriebenen Traktionsmotoren können grundsätzlich in einem breiten Temperaturbereich betrieben werden. Die kurzzeitig maximal mögliche Betriebstemperatur liegt zumeist unter 180 °C. Beim PSM ist zu beachten, dass die Permanentmagnete bei einer zu hohen Temperatur ihre Magnetisierung verlieren und der Motor somit nicht mehr funktionsfähig ist. Die Kühlleistung hat bei E-Maschi-

nen einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerleistung im Verhältnis zur Maximalleistung (Auer, 2016). Neben der bei allen E-Achsen-Komponenten vorhandenen Gehäusekühlung wird die E-Maschine mit Wasser-Glykol und zum Teil mit Öl gekühlt. Eine Wassermantelkühlung mit einem Kühlkreislauf im Gehäuse ist bei den meisten E-Maschinen Standard. Zusätzlich kann eine Rotorinnenkühlung erfolgen, bei

der die Rotorwelle von innen mit dem Kühlmittel durchspült wird. Alternativ können die Welle sowie der Zwischenraum zwischen Rotor und Stator in den Ölkreislauf des Getriebes integriert und somit gekühlt werden. Eine Ölkühlung des Stators ermöglicht die Wärmeabfuhr direkt von den Spulen als primäre Wärmequelle. Eine noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindliche Technologie sind innengekühlte Hohldrähte in der Statorwicklung. Durch die nahezu optimale Wärmeabfuhr kann ein hoher Anteil des Gewichts der E-Maschine im Vergleich zu einer Wassermantelkühlung eingespart werden (Nitsche & Naderer, 2017), (Doerr, et al., 2018), (Pischinger & Seiffert, 2016), (Tochtermann, et al., 2017).

2.1.2. Betrachtete Anwendungsgebiete im Rahmen dieses Themenpapiers

Die Betrachtung im Rahmen dieses Themenpapiers beschränkt sich auf solche E-Motoren-Varianten, die grundsätzlich im Fahrzeugbau Anwendung finden und im direkten und indirekten Zusammenhang mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs stehen. Im direkten Zusammenhang stehen

Traktionsmotoren, die als Motor für den Vortrieb ebenso wie als Generator zum Rekuperieren (Rückgewinnen) von Bremsenergie und zum Laden der Batterie eingesetzt werden (siehe Abbildung 9). Indirekter Zusammenhang besteht für E-Motoren in der Kategorie Mittlere Motoren, die für eine Elektrifizierung weiterer Komponenten außerhalb des Antriebsstrangs eingesetzt und für den allgemeinen Fahrzeugbetrieb benötigt werden. Die Kategorie umfasst beispielsweise elektrische Klimakompressoren, Kühlmittelpumpen, Bremskraftverstärker und Lenkungen. Kleine Motoren und die jeweiligen Technologien, die unabhängig vom Antriebsstrang im Fahrzeug verbaut werden und bereits in Verbrennerfahrzeugen Anwendung finden, wie beispielsweise E-Motoren für Komfortfunktionen, werden untergeordnet behandelt. Gründe hierfür sind die geringe Wertschöpfung, die primär in Niedriglohnländern erfolgt, sowie begrenzte Technologiesprünge in dieser Kategorie. Die Analyse der Deltaumfänge zum Einsatz von E-Motoren in Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Verbrennerfahrzeugen dient somit als Grundlage zur Identifikation zukünftiger Trends im Bereich der Wertschöpfung.



Kategorie	Applikation	Spezifikation
Traktionsmotoren	Traktionsmotoren für BEV, PHEV, HEV und MHEV	<ul style="list-style-type: none"> Spannungsbereich: 48–800 V Leistungsbereich: 5–250 kW E-Motor-Art: PSM, ASM, FSM Anzahl im Fahrzeug: 1–2
Mittlere Motoren	Elektrischer Wechselstromkompressor, elektrische Lenkung, Anlasser/Lichtmaschine, elektrischer Turbolader/Supercharger, Kraftstoffpumpe, Bremskraftverstärker	<ul style="list-style-type: none"> Spannungsbereich: 12–800 V Leistungsbereich: 300–5.000 W E-Motor-Art: BLDC, PSM, FSM Anzahl im Fahrzeug: 5–8
Kleine Motoren	Sonnendach, elektrische Fensterheber, Kofferraumlift, Türschlösser, klappbare Seitenspiegel, Spiegelverstellung, elektrische Parkbremse, Ölpumpe, Wasserpumpe, Kühler, Scheibenwischer	<ul style="list-style-type: none"> Spannungsbereich: 5–18 V Leistungsbereich: bis zu 300 W E-Motor-Art: Gleichstrom-Bürstenmotoren und bürstenlose (BLDC) Gleichstrommotoren Anzahl im Fahrzeug: 15–60

Abbildung 9: E-Motor-Konzepte und deren Kategorisierung

Quelle: Fahrzeug: Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Traktionsmotor: Schaeffler AG, Mittlere Motoren: Robert Bosch GmbH, Kleine Motoren: Robert Bosch GmbH

Für die drei oben beschriebenen Motorkategorien wurde aufgrund der ihnen eindeutig zurechenbaren Motorentypen eine kostenseitige und marktseitige Bewertung in Kapitel 3 des Themenpapiers vorgenommen. Im Folgenden werden die Kategorien detaillierter dargestellt und es wird eine Auswahl aktueller Anwendungsbeispiele im Automobil beschrieben. Darüber hinaus werden die Anwendungsbeispiele nach Differenzierungsmerkmalen hinsichtlich Antriebsart und Preiskategorie untersucht.

Unter die Kategorie Traktionsmotoren fallen sämtliche E-Motoren, die für den Vortrieb des elektrifizierten Fahrzeugs benötigt werden. Dazu zählen sowohl Hybridfahrzeuge (Mild Hybrid Electric Vehicle „MHEV“, Hybrid Electric

Vehicle „HEV“, Plug-in-Hybrid Electric Vehicle „PHEV“ als auch vollelektrische batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV). Eine detaillierte Beschreibung der Antriebskonzepte wurde in der Strukturstudie BW^e mobil 2019 bereits ausgearbeitet und dient hier als Grundlage der weiteren Untersuchung. Wie bereits am Anfang des Kapitels erwähnt, liegt der Fokus auf den zusätzlich benötigten E-Motoren bei elektrifizierten Fahrzeugen und somit auf den Kategorien Traktionsmotoren und Mittlere Motoren. Kleine Motoren, die größtenteils für allgemeine Komfortfunktionen im Fahrzeug verbaut sind, werden aus technischer Sicht nicht weiter betrachtet und im Rahmen der Wertschöpfungsanalyse nur als Cluster aufgezeigt. Im Bereich der Traktionsmotoren für elektrisch angetriebene Fahrzeuge (EV) ist die dominierende Motorbauart

der Permanentmagnet-Synchronmotor. Dieser ist effizienter und leistungsdichter als die Bauformen Asynchronmotor und Fremderregter Synchronmotor.

In die Kategorie Mittlere Motoren fallen E-Motoren im Leistungsspektrum von 300 bis 5.000 Watt. Diese Motoren werden beispielsweise für Klimakompressoren und elektrische Lenkungen eingesetzt. BLDC-Motoren sind im mittleren Leistungsbereich bereits verbreitet, jedoch wird diese Kategorie weiterhin von Bürstenmotoren dominiert. Auch in der Kategorie Mittlere Motoren bestimmen die Anforderungen an Effizienz und Verschleiß die Wahl des eingesetzten Motortyps. Bei den Anwendungsfällen sind beispielsweise fahrwerksspezifische Motoren unabhängig von der Antriebsart eingestuft. Kompressoren für Luftfahrwerke oder zur Wank-Stabilisierung werden sowohl in rein elektrischen Fahrzeugen als auch in konventionellen Verbrennern vor allem in Fahrzeugen der Oberklasse in gleichem Umfang verbaut (siehe Abbildung 10). Bei Kraftstoffpumpen oder elektrischen Turboladern hängt es von der Antriebsart ab, ob und in welcher Dimensionierung diese benötigt werden.

Die Kategorie Kleine Motoren umfasst sämtliche kleineren Motoren, die im Fahrzeug für den Betrieb benötigt werden und größtenteils bereits in herkömmlichen Verbrennerfahrzeugen verbaut sind. Ein Beispiel ist hier der Motor zum Betrieb einer Wischwasserpumpe. Darüber hinaus werden in dieser Kategorie auch Motoren für die Komfortfunktionen, wie beispielsweise elektrische Fensterheber, zugeordnet. Diese werden ebenfalls unabhängig von der Antriebsart im Fahrzeug eingesetzt. Mit einer Leistung von bis zu 300 Watt werden im Schnitt zwischen 15 und 60 Motoren pro Fahrzeug und je nach Ausstattungsvariante verbaut. Für diese Anwendungen werden aus Kostengründen meist Bürstenmotoren eingesetzt. Für Anwendungen mit geringeren Leistungsanforderungen, bei denen Effizienz und Verschleiß weniger relevant sind, ist der Bürstenmotor die Technologie mit dem größten Marktanteil. BLDC-Motoren werden hingegen für spezifische Anwendungen mit hoher Nutzungsdauer und der damit einhergehenden hohen Anforderung an die Effizienz, wie beispielsweise bei aktiv mitlenkenden Scheinwerfern, eingesetzt.

Starter- und Traktionsmotoren in Abhängigkeit vom Elektrifizierungsgrad

Die Technologie und die Leistung von Traktions- und Startermotoren bzw. Lichtmaschinen unterscheiden sich nach dem Elektrifizierungsgrad des Antriebsstrangs (siehe Abbildung 11). Konventionelle Verbrennungsmotoren haben in der Regel einen Gleichstrom-Bürstenmotor mit 0,8–1,7 kW und eine FSM-Lichtmaschine mit 2,5–10 kW, die beide auf einem 12-V-Spannungslevel basieren. Zur Steigerung der Effizienz von reinen Verbrennerfahrzeugen werden für größere Energieverbraucher, die bisher über Riemen angetrieben wurden, vermehrt BLDC-Motoren eingesetzt. So wird beispielsweise die Verwendung einer rein elektrischen Lenkhilfe anstatt einer über den Keilriemen angetriebenen hydraulischen Servolenkung durch die fortschreitende Elektrifizierung im automobilen Sektor möglich.

Hybride Antriebsstränge, wie Mild-Hybride, haben oftmals zusätzlich zu einem herkömmlichen Starter noch einen sogenannten Startergenerator. Dieser fungiert als unterstützender Antrieb für den Verbrenner sowie als Generator zur Rekuperation der Bewegungsenergie beim Bremsen. Hierbei werden PSM-, ASM- oder FSM-Technologien zwischen 8 und 20 kW eingesetzt. Startergeneratoren von Mild-Hybriden werden in der Regel von einer separaten 48-V-Lithium-Ionen-Batterie gespeist. Da kleine Lithium-Ionen-Batterien für Kaltstarts meist nicht die benötigte Leistung aufbringen können, sind auch konventionelle Starter und Starterbatterien weiterhin im Fahrzeug verbaut.

Bei Voll- oder Plug-in-Hybriden kann der Verbrennungsmotor mit den größeren Lithium-Ionen-Batterien auch durch den Antriebsmotor gestartet werden, wodurch der Starter entfallen kann. Die Antriebsmotoren sind meist PSM, basierend auf einer 400-V-Architektur, und leisten zwischen 30 und 100 kW. Grundsätzlich ist auch der Einsatz von ASM und FSM möglich, jedoch werden aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse bei Hybridfahrzeugen PSM bevorzugt.

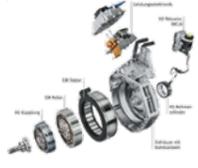
Für rein batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) kommen als Antriebsmotoren sowohl PSM als auch ASM und FSM zum Einsatz. Typischerweise leisten diese je nach Bauart und Fahrzeug zwischen 60 und 300 kW und arbeiten basierend auf einer 400- bis 800-V-Architektur. Weil der Verbrennungsmotor wegfällt, wird kein separater Starter benötigt.

Kategorie	Motortyp	Verbrennungsmotor ICE	Hybrid MHEV, PHEV, HEV	Rein elektrisch BEV
	Fokustechnologien			
Traktionsmotoren 	PSM			
	ASM			
	FSM			
Mittlere Motoren 	BLDC	Starter		
	PSM		400- und 800-V-Traktionsmotoren	
	FSM		48-V-Starter/-Generator	
			Elektrischer Kompressor	
Kleine Motoren 	BLDC			Wasserpumpe
	Gleichstrom-Bürstenmotor			Komfortmerkmale: Sitzverstellung, Spiegel, Zentralverriegelung, Fenster, Parken und Handbremse
				Bremskraftverstärker, Servolenkung
				Luftfederkompressor, Hinterachslenkung, Fahrstabilisierung
				Ölpumpe

■ Differenzierung nach Antriebsstrangart ■ Differenzierung nach Preiskategorie

Quellen Kategorien: Traktionsmotoren: Schaeffler AG, Mittlere Motoren: Robert Bosch GmbH, Kleine Motoren: Robert Bosch GmbH; Quellen Fahrzeuge: ICE: Audi AG, MHEV, PHEV, HEV: Audi AG, BEV: Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG

Abbildung 10: Anwendungsgebiete der unterschiedlichen Motortypen

	Verbrennungsmotor	Hybrid	BEV	
Traktion	Nicht vorhanden	Traktionsmotoren für HEV und PHEV Typ: PSM, ASM Eingangsspannung: 400 V Leistung: 30–100 kW 	Traktionsmotor Typ: PSM, ASM, FSM Eingangsspannung: 400–800 V Leistung: 60–3.000 kW 	
Startergenerator	Nicht vorhanden	Startergenerator (Traktion) Typ: PSM, ASM, FSM Eingangsspannung: 48 V Leistung: 8–20 kW 	Nicht vorhanden	
Starter und Generator	Anlasser Typ: Bürstenmotor, universal Eingangsspannung: 12 V Leistung: 0,8–1,7 kW	Lichtmaschine Typ: FSM Eingangsspannung: 12 V Leistung: 2,5–10 kW 	Anlasser Typ: Bürstenmotor, universal Eingangsspannung: 12 V Leistung: 0,8–1,7 kW Details: Die meisten HEV benötigen zum Kaltstart noch einen Anlasser, da kleine 48-V-Lithium-Ionen-Batterien unter kalten Bedingungen nicht mit ausreichend Strom versorgt werden 	Nicht vorhanden

Quelle: Lichtmaschine: SEG Automotive Germany GmbH; Anlasser: SEG Automotive Germany GmbH; Startergenerator (Traktion): ZF Friedrichshafen AG; Traktionsmotor HEV und PHEV: Schaeffler AG; Traktionsmotor: Audi AG

Abbildung 11: Übersicht Motorkonzepte und Anwendungsgebiete im Fahrzeug

Antriebstopologie

Hinsichtlich der Antriebstopologie bieten elektrische Antriebe eine Vielzahl an Freiheitsgraden bei der Anordnung im Fahrzeug, wodurch sich zahlreiche Varianten umsetzen lassen. Eine verbreitete Art der Unterscheidung ist die Nähe des E-Motors zum angetriebenen Rad. Bei Zentralantrieben ist der Motor mit dem Getriebe zentral im Fahrzeug angeordnet und leitet die Antriebsleistung über Differenziale an eine oder mehrere angetriebene Achsen weiter. Damit wäre ein Allradantrieb mit nur einem E-Motor möglich. Da diese Topologie einen komplexen und schweren Antriebsstrang erfordert, ist sie im PKW wenig verbreitet. Die heute am weitesten verbreitete Topologie ist der Achsantrieb. Motor und

Getriebe sind dabei direkt an der angetriebenen Achse angeordnet. Damit lassen sich Front- und Heckantrieb mit jeweils einem Achsantrieb oder Allradantrieb mit zwei unabhängigen Achsantrieben konfigurieren. Radnahe Antriebe und Radnabantriebe bieten die Möglichkeit, jedes Rad einzeln mit einem eigenen E-Motor und vergleichsweise kompaktem Antriebsstrang anzutreiben. Während radnahe Antriebe auf der Achse positioniert sind, werden Radnabantriebe direkt in das Rad integriert. Grundsätzlich sind die vier genannten Topologien kombinierbar, wobei Serienfahrzeuge meist nur eine Topologie besitzen. Der Fokus des vorliegenden Themenpapiers liegt jedoch auf dem Konzept der E-Achse, bei der E-Motor, Leistungselektronik und Getriebe in einer kompakten Einheit kombiniert sind. Diese lässt sich

dem Achsantrieb zuordnen und ist die am weitesten verbreitete Technologie (Tschöke, 2015), (Pischinger & Seiffert, 2016).

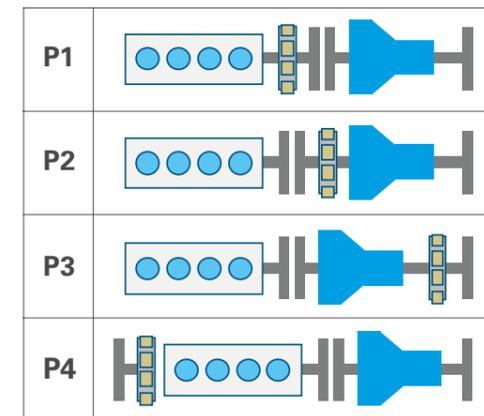
Die oben beschriebenen verschiedenen Antriebstopologien gelten sowohl für reine Elektrofahrzeuge als auch für serielle Hybride, bei denen der Verbrennungsmotor keine mechanische Verbindung zur Antriebsachse hat und lediglich einen Generator antreibt. Bei Parallel-Hybriden, die neben dem E-Motor auch eine direkte Verbindung des Verbrennungsmotors und der Antriebsachse haben, sind diese Topologien bei einer sog. Axle-Split-Anordnung ebenfalls vorzufinden und werden als Antriebstopologie P4 bezeichnet (siehe Abbildung 12). Dabei treibt der Verbrennungsmotor eine der beiden Achsen und der elektrische Antriebsstrang die jeweils andere Achse an. Beispiele für diese Topologie sind die PHEV-Fahrzeuge BMW X1 25e und PEUGEOT 3008 HYBRID4, bei denen jeweils die Hinterachse allein über einen E-Motor angetrieben wird.

Parallel-Hybride bieten zusätzlich die Möglichkeit, den E-Antrieb direkt in den Antriebsstrang des Verbrennungsmotors zu integrieren. Diese Anordnung ist vor allem bei einem geringeren Elektrifizierungsgrad wie bei Mikro- und Mild-Hybriden

üblich, wird allerdings auch bei einigen PHEV wie beispielsweise dem Porsche Cayenne E-Hybrid eingesetzt. Diese Antriebstopologien werden als P1 bis P3 bezeichnet. Die Antriebstopologien unterscheiden sich dabei hinsichtlich der Positionierung des E-Motors. Bei der Topologie P1 dient der E-Motor als erweiterte Schwungmasse des Verbrennungsmotors und das Fahrzeug kann nicht ohne laufenden Verbrennungsmotor bewegt werden. Die Antriebstopologien P2 und P3 sind durch eine Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt und ermöglichen eine Fahrt ohne laufenden Verbrennungsmotor. Die beiden Antriebstopologien unterscheiden sich hinsichtlich der Position des E-Motors. Beim P2 ist der E-Motor vor dem Getriebe verbaut, wohingegen bei Topologie P3 der E-Motor hinter dem Getriebe verbaut ist. (Reif, et al., 2012), (Gassmann, et al., 2017), (Pischinger & Seiffert, 2016), (Schwarzer, 2018).

2.1.3. Schnittstellenkomponenten

Neben dem E-Motor gibt es beim elektrischen Antriebsstrang noch weitere Komponenten, die es zu betrachten gilt. In diesem Abschnitt soll vor allem das Zusammenspiel des Motors mit dem Inverter und dem Getriebe veranschaulicht werden (siehe Abbildung 13). Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten eines elektrischen Antriebsstrangs bieten für die Hersteller und Zulieferer großes Optimierungspotenzial. Standardisierte Schnittstellen und integrierte Konstruktionen ermöglichen zunehmend kompaktere Konzepte und reduzieren Hochvolt- und Kühlungsanschlüsse, wodurch Kostenvorteile generiert werden können. Elektrische Antriebsstränge, die auf Verbrennerplattformen aufgebaut sind, bedürfen einer hohen Flexibilität. So sind in diesem Fall aufgrund der komplexen Fahrzeugintegration oftmals einzelne Komponenten, wie beispielsweise Inverter und DC/DC-Wandler, im Fahrzeug verteilt und nicht gemeinsam mit dem E-Motor und dem Getriebe in einer Einheit integriert.



☐☐☐☐ Verbrennungsmotor | E-Motor | ▶ Getriebe

Abbildung 12: Übersicht Antriebstopologien in Hybridfahrzeugen

Quelle: Eigene Darstellung

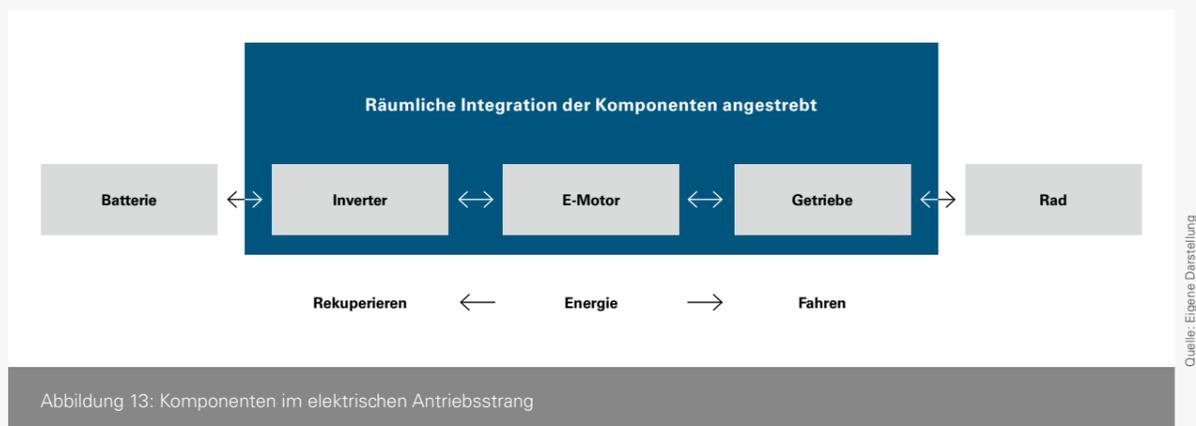


Abbildung 13: Komponenten im elektrischen Antriebsstrang

Inverter

Im Elektrofahrzeug wird die Energie in Batterien in Form von Gleichspannung bereitgestellt. Der Inverter (auch Wechselrichter genannt) wandelt die Gleichspannung für die Versorgung des E-Motors in dreiphasige Wechselspannung mit variabler Frequenz und Amplitude. Im Inverter wird mithilfe der Pulsweitenmodulation durch definiertes Ein- und Ausschalten der Eingangsspannung die gewünschte Ausgangsspannung erzeugt. Das Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltdauer bestimmt die effektive Höhe der Ausgangsspannung. Der benötigte Leistungsbereich des Inverters richtet sich nach den Leistungskennzahlen des verwendeten E-Motors und muss dabei dessen Überlastbereich abdecken. Die Spannungsumwandlung im Inverter kann auch in entgegengesetzter Richtung zum Rekuperieren der Bremsenergie erfolgen. Die E-Maschine arbeitet in diesem Fall als Generator und speist den Inverter mit Wechselspannung. Die im Inverter erzeugte Gleichspannung wird dann zum Laden der Batterie genutzt (Kampker, 2014), (Specovius, 2013), (Kampker, et al., 2013), (Tschöke, 2015).

Getriebe

Obwohl E-Motoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren einen wesentlich größeren nutzbaren Drehzahlbereich besitzen, wird in den meisten Anwendungsfällen dennoch ein Getriebe benötigt. Der Einsatz eines Getriebes ermöglicht eine höhere Leistungsdichte durch einen kompakteren E-Motor, da dieser bei einer höheren Drehzahl arbeiten kann und somit bei gleicher Geschwindigkeit ein höheres Drehmoment mit kleinen Motoren realisiert werden kann. Das Getriebe ist zwischen Motor und angetriebenen Rädern ver-

baut und dient der Anpassung des Motorenkennfelds an das Bedarfskennfeld. Ziel der Getriebeauslegung ist ein effizienter Betrieb des Fahrzeugs mit einer guten Fahrdynamik (Fischer, et al., 2016), (Tschöke, 2015).

Bei heutigen Serienanwendungen besitzt das Fahrzeug zu meist ein Achsdifferenzialgetriebe, das über einen oder mehrere E-Motoren zentral angetrieben wird. Die Getriebeübersetzung wird durch Stirnrad- oder Planetengetriebe erzeugt und der Drehzahlausgleich zwischen den Rädern erfolgt über Kegelrad- oder Stirnraddifferenziale (Tschöke, 2015), (Heizenröther, 2005).

Eine Drehzahl von maximal 12.000 U/min bildet bei heutigen Serienmotoren die untere Grenze ab. In Forschungsprojekten werden bereits Hochdrehzahlkonzepte mit bis zu 30.000 U/min getestet, woraus je nach Fahrzeugkonzept ein Gesamt-Übersetzungsverhältnis von über 20 resultieren kann. Die verwendeten Getriebe besitzen eine bis drei Stufen. Pro Stirnradstufe wird eine maximale Übersetzung von sechs empfohlen, da sich anderenfalls ungünstige Abmessungen und ein stärkerer Verschleiß der Zahnräder ergeben (Gwinner, et al., 2017), (Wittel, et al., 2017), (Pischinger & Seiffert, 2016). Neben den zentralen Achsdifferenzialgetrieben werden bei radnahen Antrieben Untersetzungsstufen ohne Differenzial verwendet, da hierbei jedes Rad einzeln durch eine eigenständige E-Maschine angetrieben wird. Bei Radnabenantrieben wird die Untersetzung beispielsweise durch Planetengetriebe erreicht oder es wird vollständig auf ein Getriebe verzichtet. Radnahe Antriebe und Radnabenantriebe finden aktuell lediglich in Konzeptfahrzeugen oder in Kleinserien Verwendung (Tschöke, 2015).

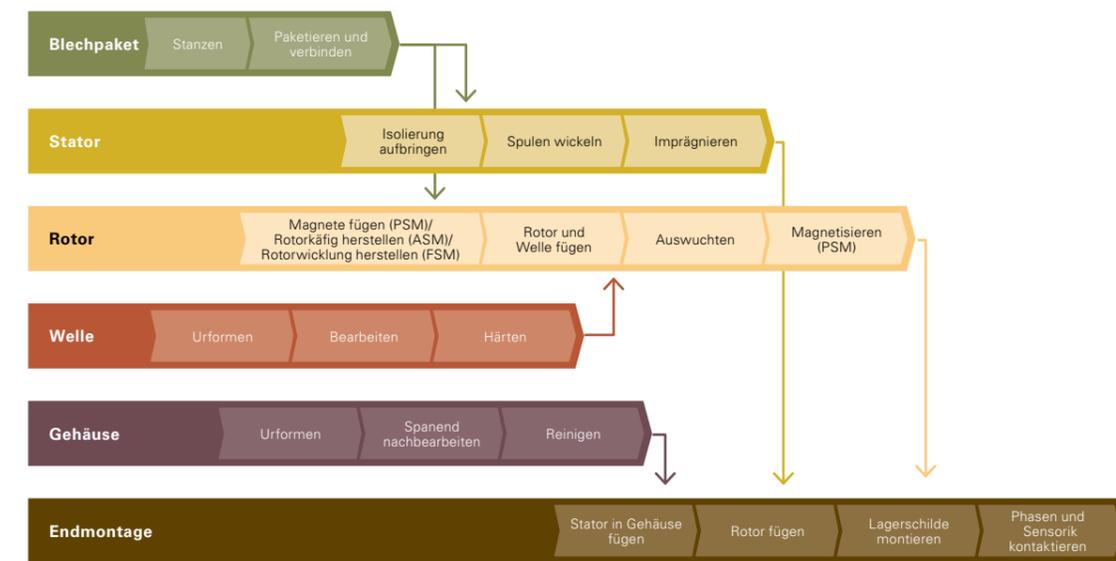
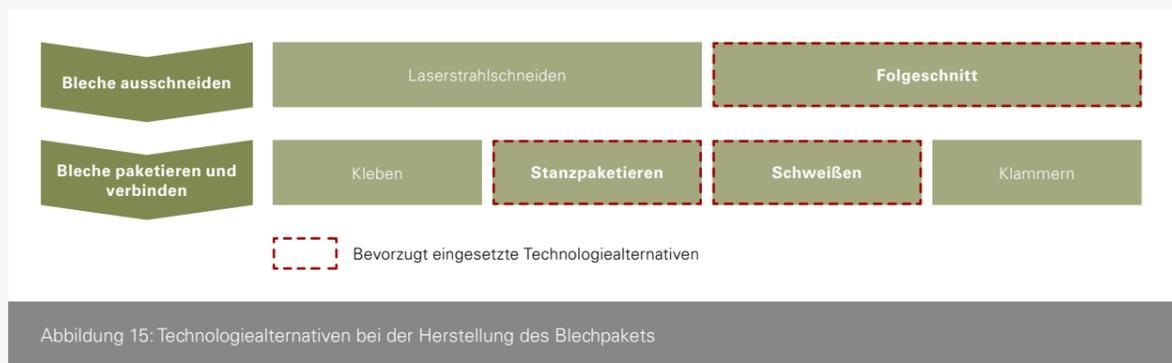


Abbildung 14: Referenz Produktionsprozess elektrischer Maschinen (Prüf- und Messprozesse sind nicht abgebildet)

2.2. Produktionsverfahren E-Motoren

Die Produktionsschritte des E-Motors gliedern sich nach dessen Hauptkomponenten: Blechpaket, Welle, Rotor, Stator und Gehäuse. Diese werden zunächst unabhängig voneinander hergestellt und in der Endmontage zusammengefügt. Abbildung 14 zeigt dabei die Abfolge der Herstellungsprozesse der Subkomponenten sowie der Montage des E-Motors als Referenzprozess. Dabei werden Rotor und Welle i. d. R. bereits vor der Endmontage gefügt. Je nach Motorkonzept und Anwendungsfall können einzelne Prozessschritte wegfallen oder sie variieren in ihrer Abfolge. Beispielsweise besitzt ein Integrierter Motorgenerator (IMG) für Hybridfahrzeuge kein dezidiertes Gehäuse, da er in das Getriebe des Verbrennungsmotors integriert wird. Dadurch werden einzelne Prozessschritte, die aktuell in der Endmontage vorgenommen werden, wie das Kontaktieren der Phasen und Sensoren, in die Produktion des Stators integriert (Kampker, 2014), (Reif, 2011). Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Produktionsschritte von Traktionsmotoren wird auch in „Wissen Kompakt: Produktion elektrischer Traktionsmotoren“ (e-mobil BW, Juni 2020) beschrieben. Die im Folgenden betrachteten Produktionsschritte sind dabei nicht nur für die Hersteller von E-Motoren

von Relevanz, sondern insbesondere auch für die Unternehmen im Bereich Maschinen- und Anlagenbau, die die Fertigkeiten als Lieferant von Produktionsequipment für E-Motoren besitzen.



Quelle: Eigene Darstellung

2.2.1. Blechpaket

Am Beginn der Stator- und Rotorproduktion steht die Herstellung des Blechpakets (auch Lamellenpaket genannt). Die Herstellungsprozesse sind bei Stator und Rotor identisch. Das Ziel der gestapelten Elektrobleche ist die Minimierung von Wirbelströmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads. Dazu müssen die einzelnen Bleche möglichst gut gegeneinander isoliert werden, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Das Ausgangsmaterial ist gewalztes Elektrobend, das einen besonders positiven Einfluss auf den magnetischen Fluss hat. Bei der Produktion kommen für das Ausschneiden der Bleche die Produktionsverfahren Laserstrahlschneiden und Folgeschnitt zum Einsatz, wohingegen das Paketieren und Verbinden der Bleche durch Kleben, Stanzpaketieren, Schweißen oder Klammern abgebildet wird (siehe dazu Abbildung 15). In der Fertigung von Traktionsmotoren für Automobilanwendungen kommen jedoch hauptsächlich die Verfahren Folgeschnitt und Stanzpaketieren sowie Schweißen zum Einsatz. (Kampker, 2014), (Dorner, et al., 2009). Die Isolation zwischen den einzelnen Blechen wird in der Produktion von Traktionsmotoren entweder durch bereits beschichtetes Elektrobend, das mittels Stanzpaketieren gefügt wird, oder über das Kleben mittels Backlack realisiert. Das Backlackverfahren kommt jedoch aufgrund der höheren Kosten nur in Sonderfällen zum Einsatz.

2.2.2. Statorproduktion

Der Stator ist, bezogen auf die Gesamtkosten der Maschine, mit einem Anteil von ca. 35 % (abhängig vom Motortyp) das teuerste Bauteil des E-Motors. Die hohen Kosten werden im Falle des PSM durch teure Materialien und bei FSM und ASM durch aufwändige Produktionsprozesse verursacht

(Kampker, 2014). Für die Kernprozesse Isolierung aufbringen, Spulen wickeln und Imprägnieren existieren mehrere Technologiealternativen (siehe Abbildung 16), die im Folgenden erklärt werden.

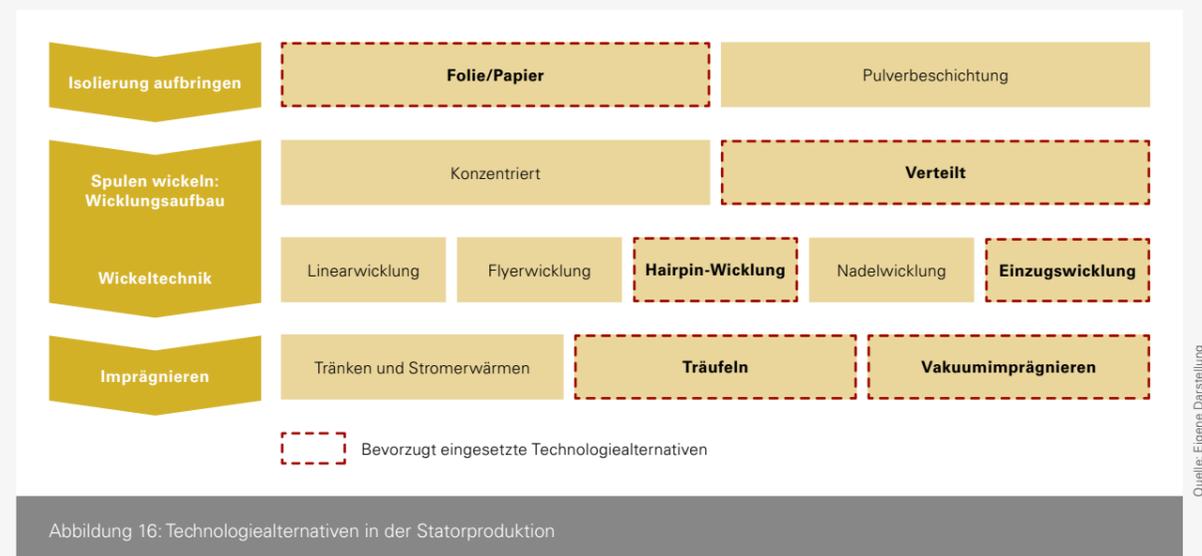
Isolierung aufbringen

Um einen elektrischen Kurzschluss zwischen Spulenwicklungen und Blechpaket zu verhindern, werden die Nuten des Blechpakets mit einer Isolation versehen. Bei Motoren für die automobiler Anwendung werden hauptsächlich Papier- oder Folienisolationen genutzt. Diese werden vorgeformt und anschließend in die Nuten geschoben (Kampker, 2014). Ein anderer Ansatz wird beim elektrostatischen Pulverbeschichten verfolgt. Das Isolierpulver wird elektrostatisch in den Nuten appliziert und durch eine anschließende induktive Erwärmung ausgehärtet. Das Verfahren eignet sich besonders für kleine Motoren und Geometrien (Pietschmann, 2003).

Spulen wickeln

Für die Herstellung der Spulen werden in der Praxis mehrere Verfahren angewendet. Bei der Auswahl der passenden Technologie stehen folgende Ziele im Vordergrund (Fleischer, et al., 2017):

- Der Drahtanteil außerhalb der aktiven Länge in den sogenannten Wickelköpfen soll minimiert werden, da diese nicht zur Energiewandlung beitragen. Deshalb wirkt sich dieser Anteil auf Kosten, Energieeffizienz und Bauraum aus.
- Der Füllfaktor der Nuten mit Kupfer ist zu maximieren, um Bauraum und Energieeffizienz zu optimieren.



Quelle: Eigene Darstellung

- Eine flexible Automatisierbarkeit der Anlagen ist anzustreben.

Statorspulen können bezüglich des Wicklungsaufbaus unterschieden werden. Für konzentrierte Wicklungen wird der Spulendraht auf einzelne Zähne (Einzelpole) gewickelt, die anschließend im Stator zusammengesetzt werden. Wenn die einzelne Spule über mehrere Zähne verteilt gewickelt ist, handelt es sich um eine verteilte Wicklung (Hagedorn, et al., 2016). Dabei werden in der Regel folgende Wickelverfahren bei der generellen E-Motoren-Herstellung unterschieden: Linearwicklung, Flyerwicklung, Hairpin-Wicklung, Nadelwicklung und Einzugwicklung. Im Rahmen der Traktionsmotorenproduktion werden für die Produktion hauptsächlich die Wickelverfahren: Einzugwicklung und Hairpin-Wicklung eingesetzt und im Folgenden genauer erläutert.

Einzugwicklung (Insertion Winding)

Die am weitesten verbreitete Wickeltechnologie für dreiphasige Wechselstrommotoren ist die Spulenwicklung. In diesem zweistufigen Prozess wird mit einem Draht in sog. Flyerwickeltechnik eine Spule oder Wicklung erzeugt. Dabei werden bis zu fünf Drähte gleichzeitig durch einen rotierenden Flyer auf einer Schablone abgelegt. Die vorgewickelten Spulen werden auf eine Maske mit der gleichen Anzahl von Schlitzen wie im Stator gelegt. Im zweiten Schritt werden die vorgewickelten Spulen mit eingelegter Schlitzisolation

in das Blechpaket eingezogen. Die Bestückung kann je nach Polanordnung und Automatisierungsgrad in einem oder in mehreren Schritten erfolgen.

Bei dieser ausgereiften Technologie ist die hohe Flexibilität beim Vorwickeln (Pre-Winding) sowohl hinsichtlich des Drahtdurchmessers als auch der Anzahl an Wicklungen vorteilhaft, sie ermöglicht ein breites Einsatzspektrum. Der stabile Prozess und die kurzen Zyklen eignen sich vor allem für kleinere Produktionsvolumen mit geringem Automatisierungsgrad. Eine automatische Kontaktierung ist aufgrund der flexiblen Drähte nur eingeschränkt möglich. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass während der Einzugwicklung die elektrische Isolation beschädigt wird. Der Füllfaktor der Kupferspule liegt bei maximal 60%.

Hairpin-Wicklung

Die Hairpin-Wickeltechnik ist aufgrund des hohen Automatisierungspotenzials in Automotive-Anwendungen weit verbreitet. Der Prozess ist in vier Kernschritten unterteilt. Im ersten Schritt wird der Kupferdraht in die gewünschte Form gebracht. Im zweiten Schritt wird die geformte Nadel in die Nuten des Stators geschoben. Anschließend werden die Enden der montierten Nadeln verdreht, um diese zu kontaktieren. Die Leiter werden verbunden, um eine mechanische und elektrische Verbindung zum Schließen der Wicklungen zu bilden.

Vorteile der Hairpin-Wickeltechnik sind die deutlich höhere Kupferdichte (Füllfaktor) und größere Leitungsquerschnitte der Drähte, wodurch höhere Spannungen möglich sind. Ein hoher Automatisierungsgrad bei der Produktion ermöglicht darüber hinaus Skaleneffekte bei einer Industrialisierung, sofern die Investitionskosten für eine automatisierte Fertigung aufgebracht werden können.

Imprägnieren

Die Spulen werden nach dem Wickeln mit Harz imprägniert, um die elektrische Isolation, die thermische Leitfähigkeit und den Schutz vor mechanischer Beanspruchung zu verbessern.

Bei allen relevanten Technologien wird zuerst flüssiges Harz appliziert und dieses danach unter Hitzeeinwirkung ausgehärtet. Aufgrund der kürzeren Taktzeiten und der gezielteren Applikation des Harzes wird in der Elektromobilität das Tränken und Träufeln bevorzugt. Das Vakuumimprägnieren wird heute nur noch in der Generatorherstellung und in Sonderfällen angewandt (Kampker, 2014).

2.2.3. Wellenproduktion

Die Welle besitzt die Aufgabe, das erzeugte Drehmoment zu übertragen. Das Ausgangsmaterial für die Fertigung der Welle ist ein Rundstab oder ein Rohr aus Stahl. Es wird zwischen Voll- und Hohlwelle unterschieden. Aufgrund des aufwändigeren Fertigungsverfahrens finden Hohlwellen aktuell in E-Motoren noch wenig Verwendung. Wegen der Ge-

wichtersparnis wird in Zukunft allerdings ein vermehrter Einsatz von Hohlwellen erwartet (Kampker, 2014).

Formgebung

Bei der Kaltumformung wird der auf Länge geschnittene Rundstab zunächst gegläht und nach dem Abkühlen in mehreren Schritten in einer Presse durch eine Matrize gepresst. Anschließend erfolgt aufgrund teilweise komplexer Geometrien eine spanende Bearbeitung. Bei geringen Stückzahlen kann die Formgebung auch ausschließlich spanend erfolgen, da sich die hohen Investitionskosten einer Anlage zur Kaltumformung erst bei größeren Stückzahlen amortisieren (Raedt, et al., 2014)

Spanende Bearbeitung/Rollieren

In einem Bearbeitungszentrum werden die Lagersitze nachgeschliffen und entstandener Verzug wird durch spanende Bearbeitung ausgeglichen. Sofern eine Verzahnung der Welle vorgesehen ist, wird diese gefräst (Kampker, 2014). Wird die Welle rolliert, ist kein zusätzlicher Härteprozess in der Bearbeitung mehr nötig.

Härten

Mit den verschiedenen Härteverfahren werden durch gezieltes Erwärmen und Abkühlen die Oberflächeneigenschaften der Welle verbessert. Beim Induktionshärten wird das Bauteil durch einen Induktionsstrom erhitzt und kurz danach abgeschreckt. Das Einsatzhärten hingegen nutzt für das Er-

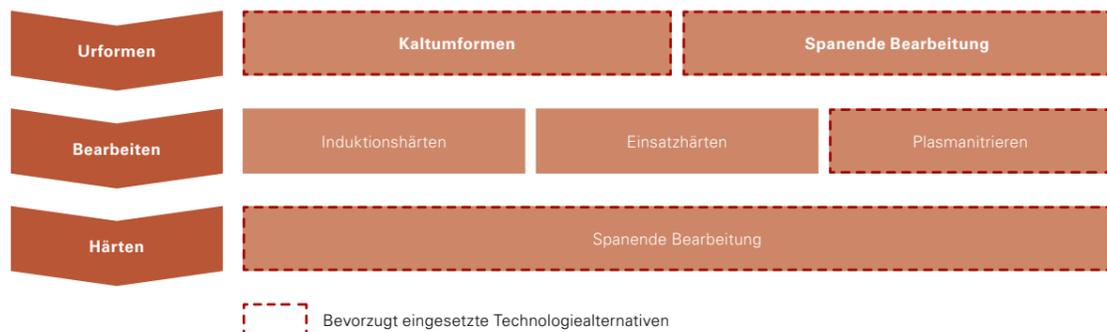


Abbildung 17: Technologiealternativen in der Wellenproduktion

Quelle: Eigene Darstellung

wärmen einen Ofen. Für das Plasmanitrieren wird die Welle zuerst in einer Vakuumkammer unter Ionenbeschuss gereinigt. Anschließend wird das Bauteil erhitzt und die Oberfläche wird aufgestickt, wodurch sich an der Oberfläche Nitride bilden. Das Plasmanitrieren erzeugt im Gegensatz zu den zuerst genannten Verfahren nur einen geringen Verzug, wodurch auf eine spätere Nachbearbeitung teilweise oder vollständig verzichtet werden kann (Raedt, et al., 2014), (Kampker, 2014).

2.2.4. Rotorproduktion

Der Rotor hat einen bedeutenden Einfluss auf die Leistung und die Laufcharakteristik des E-Motors. Daher ist die Kenntnis der Herstellungsverfahren von besonderer Bedeutung. Der Rotoraufbau unterscheidet sich bei den relevanten Motorkonzepten PSM, ASM und FSM (siehe Abschnitt 2.1.1.) deutlich, weshalb einzelne Prozessschritte variieren. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte der Rotorherstellung detailliert erläutert (siehe Abbildung 18), (Füßel, 2017).

Magnete fügen und magnetisieren (PSM)

Die Magnete werden auf dem Blechpaket entweder außen liegend (auf dem Außendurchmesser) oder innen liegend (vergraben) appliziert und verklebt. Das Magnetisieren erfolgt über ein äußeres Magnetfeld mittels Stromimpulsen. Dies kann als letzter Prozessschritt erfolgen. Bei vergrabenen Magneten ist das Magnetisieren vor dem Fügen der Welle sinnvoll. Dieser Prozessschritt kann auch vor dem Fügen der Magnete erfolgen, wodurch das Magnetisieren ausgelagert werden kann. Die nachfolgenden Prozesse hingegen werden erschwert (Junker, 2007), (Binder, 2012).

Rotorkäfig herstellen (ASM)

Das vorherrschende Verfahren zum Herstellen des Rotorkäfigs ist aufgrund des hohen Automatisierungspotenzials der Druckguss. Dabei wird der Käfig direkt in die Rotornuten des Blechpakets gegossen. Die weiteren Alternativen Dampfphasenlöten, Rührreißschweißen und Wärmeträgheitsschweißen von vorgefertigten Käfigstäben sind maßgeblich im Prototypenbau angesiedelt (Kampker, 2014).

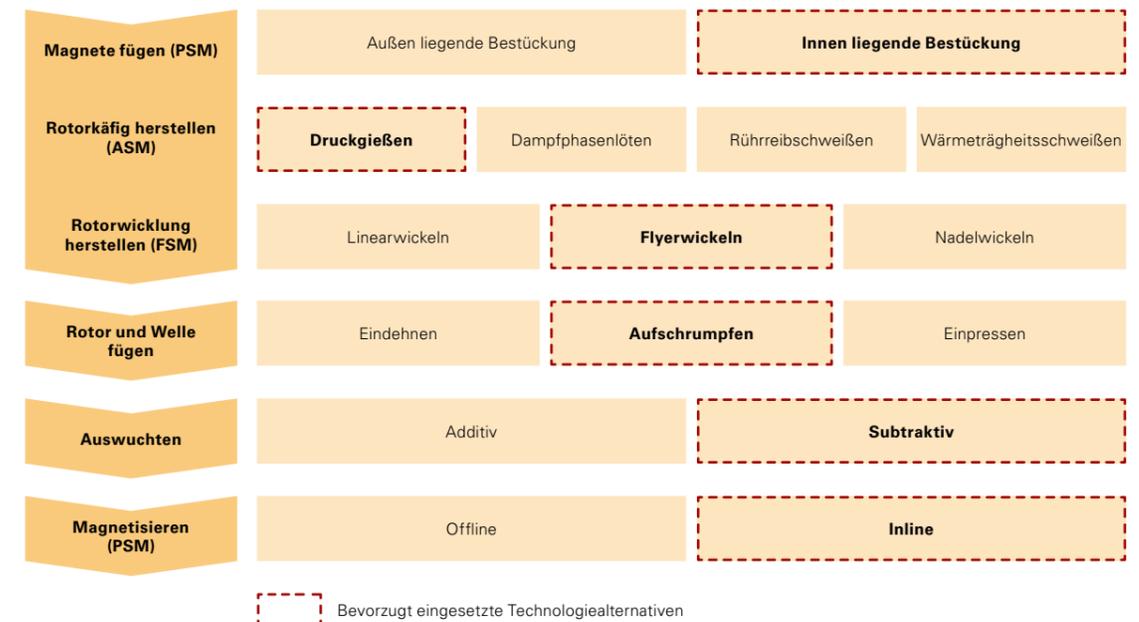


Abbildung 18: Technologiealternativen in der Rotorproduktion

Quelle: Eigene Darstellung

Rotorwicklung herstellen (FSM)

Für die Herstellung der Spulen des Rotors der FSM werden die Technologien Linearwickeln, Flyerwickeln und Nadelwickeln eingesetzt, wobei das Flyerwickeln aufgrund der geringen Prozesszeit das derzeit verbreitetste Verfahren darstellt (Fleischer, et al., 2017), (Hagedorn, et al., 2016).

Rotor und Welle fügen

Rotor und Stator wandeln, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, elektrische in mechanische Energie. Die Welle leitet die entstandene mechanische Energie als Drehmoment für den Vortrieb des Fahrzeugs an das Getriebe weiter. Um dies zu gewährleisten, müssen Welle und Rotor fest verbunden werden. Dies kann grundsätzlich formschlüssig, kraftschlüssig oder stoffschlüssig geschehen. In der Praxis haben sich kraftschlüssige Technologien etabliert. Das Aufschrumpfen und das Eindehnen nutzen die Dehnungseigenschaften von Werkstoffen. Beim Aufschrumpfen wird der Rotor erwärmt und anschließend auf die Welle gefügt. Beim Abkühlen entsteht eine kraftschlüssige Verbindung.

Mit der Technologie des Eindehnens wird die Welle z. B. mit flüssigem Stickstoff abgekühlt und gefügt. Beide Verfahren können auch kombiniert eingesetzt werden. Darüber hinaus ist ein Einpressen der Welle ohne thermische Behandlung möglich. Aufgrund des Risikos, das Blechpaket dabei zu beschädigen, wird dieses Verfahren selten genutzt (Leidich, 2008), (Kampker, 2014).

Auswuchten

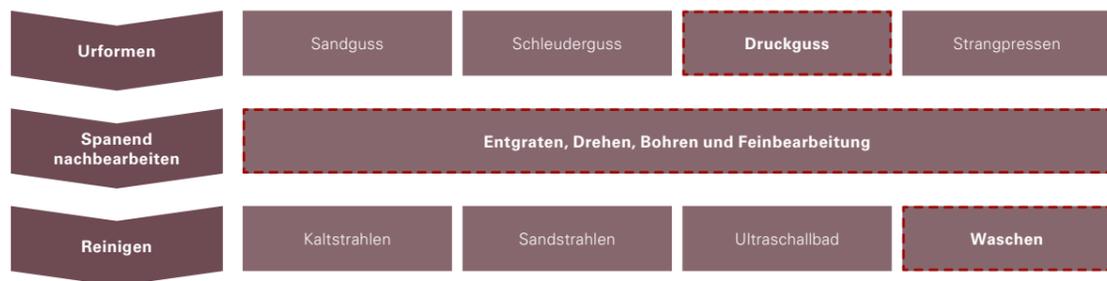
Ziel des Auswuchtens ist das Optimieren der Masseverteilung des Rotors, um einen ruhigen Lauf und eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. Dazu wird im ersten Schritt die Unwucht gemessen. Um diese auszugleichen, wird beim additiven Wuchten eine Masse, z. B. durch Schweißen oder Lötten, aufgebracht. Im Gegensatz dazu steht das subtraktive Wuchten, dabei wird an der Unwuchtposition Material durch Bohren oder Fräsen abgetragen (Schermann, 2013).

2.2.5. Gehäuseproduktion

Das Motorgehäuse muss hohe Kräfte aufnehmen können und wird zur Kühlung der Maschine eingesetzt. Die Lagersitze müssen eine hohe Genauigkeit aufweisen, um einen optimalen Luftspalt zwischen Rotor und Stator zu erzeugen und dadurch die Leistung zu maximieren. Abbildung 19 zeigt Technologiealternativen für die Gehäuseherstellung (Kampker, 2014).

Urformen

Das Urformen kann durch verschiedene Gussverfahren erfolgen, die abhängig von der produzierten Stückzahl eingesetzt werden. Der Sandguss wird lediglich in der Prototypenfertigung genutzt, wohingegen sich der Schleuderguss für kleinere bis mittlere Stückzahlen eignet. Beim Schleuderguss wird die Schmelze in eine Form gegossen und anschließend durch Rotation verteilt und abgekühlt. Für die Großserie haben sich Druckgießen und Strangpressen durchgesetzt. In beiden Verfahren wird die Schmelze durch



Bevorzugt eingesetzte Technologiealternativen

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19: Technologiealternativen in der Herstellung des Gehäuses

eine Matrizenöffnung gepresst, wodurch auch komplexe Geometrien gegossen werden können (Kampker, 2014), (Klocke, 2015).

Spanend nachbearbeiten

Auch wenn Druckgießen und Strangpressen der gewünschten Endkontur sehr nahekommen, ist eine spanende Nachbearbeitung in einem Bearbeitungszentrum notwendig. Gratte werden entfernt und die Innenkontur des Gehäuses mit den Lagersitzen wird ausgedreht, um die geforderte Oberflächengüte zu erreichen. Für die Montage der Lagerschilde wird das Gehäuse mit Bohrungen versehen (Weck, 2005), (Böge, 2007), (Kampker, 2014).

Reinigen

Im letzten Bearbeitungsschritt wird das Gehäuse von Gießrückständen, Spänen sowie Staub- und Schmutzpartikeln befreit. Beim Kaltstrahlen wird Trockeneis verwendet, das die zu entfernenden Partikel unterwandert. Das Sandstrahlen hingegen nutzt Kugelpartikel als Strahlmedium. Passungsverfälschung und Oberflächenverdichtung sind dabei entstehende Nachteile. Eine schonende Alternative stellt das Ultraschallbad dar. Das Waschen findet in Durchlauf-Reinigungsanlagen statt und eignet sich für die Großserienproduktion (Kampker, 2014).

2.2.6. Endmontage

Für die Endmontage existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien, da sich Bauform und Kundenschnittstellen stark unterscheiden können. Die am häufigsten verwendeten Technologiealternativen (siehe Abbildung 20) werden nachfolgend erklärt.

Stator in Gehäuse fügen

Ähnlich wie beim Fügen von Welle und Rotor kann das Gehäuse beim Warmschrumpfen erwärmt und anschließend über den Stator gestülpt werden. Die Erwärmung erfolgt mithilfe der Induktionserwärmung. Weitere Verfahren wie das Kleben oder Verschrauben werden seltener angewandt, da diese entweder fertigungstechnisch oder im Betrieb nachteilig sind (Kampker, 2014), (Leidich, 2008).

Rotor fügen und Lagerschilde montieren

Im ersten Schritt der Rotormontage wird das Loslager auf die Welle und das Festlager in das A-Lagerschild (Lagerschild-Abtriebsseite) gepresst. Anschließend wird der Rotor in das Gehäuse mit bereits montiertem A-Lagerschild gefügt. Dabei ist eine Kollision des Rotors mit dem Stator zu verhindern. Gerade bei PSM können durch das Magnetfeld des Rotors hohe Kräfte entstehen.



Bevorzugt eingesetzte Technologiealternativen

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 20: Technologiealternativen in der Endmontage elektrischer Maschinen

Zuletzt wird das B-Lagerschild (Lagerschild-Loslager) montiert. Die Montage der Lagerschilde kann durch Verschrauben, Kleben und Anpressen erfolgen (Kampker, 2014).

Phasen und Sensorik kontaktieren

Für die Kontaktierung von Phasen und Sensorik existieren mehrere Alternativen, die abhängig vom Kundenwunsch eingesetzt werden. Neben Stecken und Kleben sind Löten/Schweißen und Pressen die bevorzugten Technologien. Dies liegt daran, dass diese prozesstechnisch einfach abzubilden sind und eine sichere Kontaktierung darstellen. In jedem Fall sollen Wirkungsgradverluste durch hohe Übergangswiderstände und ein versehentliches Vertauschen beim Anschließen vermieden werden (Ponn & Lindemann, 2011), (Kampker, 2014).

2.3. Technologietrends von Traktionsmotoren und deren Subkomponenten

Um Wertschöpfungspotenziale bewerten zu können, sind Trends und zukünftige technologische Entwicklungen für die zu betrachtende Technologie essenziell. Bei der Entwicklung von Traktionsmotoren für den Einsatz im Fahrzeug lassen sich verschiedene Trends mit unterschiedlicher Rele-

vanz für die Hersteller und Lieferanten feststellen. Im folgenden Abschnitt sollen die wichtigsten dieser Trends vorgestellt und auf ihre Relevanz für die Wertschöpfung analysiert werden.

2.3.1. Trendanalyse Traktionsmotoren

Die zukünftige Entwicklung und Herstellung von E-Motoren werden von verschiedenen Trends beeinflusst. Die Trends werden im Folgenden vor allem hinsichtlich ihres Einflusses auf die Wertschöpfung der Hersteller und Lieferanten priorisiert. So können technische Veränderungen, wie z. B. andere Materialien oder neue Herstellungsverfahren, die Wertschöpfungstiefe eines Herstellers erhöhen oder verringern. Neben der Wertschöpfung ist auch der Reifegrad eines Technologietrends ausschlaggebend. Neue Technologien mit einem hohen Reifegrad werden zeitnah einen Einfluss auf Hersteller und Lieferanten haben. Technologien mit einem geringen Reifegrad hingegen werden in den kommenden Jahren noch nicht serientauglich sein und ihr Einsatz in der Produktion ist somit im Betrachtungszeitraum sehr unwahrscheinlich. Basierend auf dem Einfluss auf die Wertschöpfung sowie auf dem Reifegrad können die folgenden sechs Fokustrends sowie vier Trends von untergeordneter Bedeutung identifiziert werden.

Technologietrends und deren Auswirkungen auf die Wertschöpfung

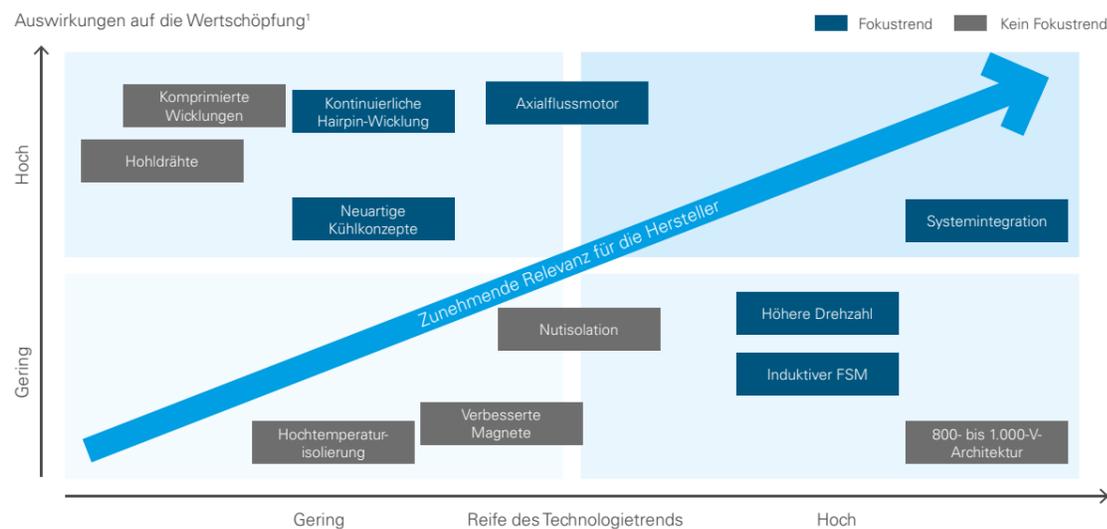
- Abbildung 21 zeigt die **Technologietrends in der Entwicklung und Herstellung von E-Motoren** aus heutiger Sicht. Als wesentliche Trends lassen sich solche zur Verbesserung der Effizienz und der Industrialisierungsfähigkeit sowie der Kostenstrukturen von E-Motoren beobachten.
- Die zwölf in Abbildung 21 dargestellten Trends wurden nach der Reife des Technologietrends und den Auswirkungen auf die Wertschöpfung bewertet. Dabei beinhaltet die Bewertung der Reife des Technologietrends zum einen eine Einschätzung der grundsätzlichen Umsetzbarkeit im Rahmen einer Großserienfertigung und berücksichtigt zum anderen den zeitlichen Rahmen für eine potenzielle Umsetzung auf dem Markt. Je höher die Reife eines Technologietrends bewertet ist, umso wahrscheinlicher ist die Durchsetzung am Markt. Ein Beispiel kann hierfür der Trend zur Systemintegration sein, dieser Trend wird bereits von vielen Herstellern umgesetzt und spiegelt sich in der E-Achse des VW I.D.3 oder im Porsche Taycan und in weiteren Fahrzeugen wider.
- Die Bewertung der Auswirkung auf die Wertschöpfung ermöglicht eine **Aussage darüber, ob sich die Wertschöpfung durch den Technologietrend ändert** – es wird dabei nicht unterschieden, ob die Wertschöpfung steigt oder sinkt, diese Bewertung wird in Kapitel 2.3.2 gesondert durchgeführt und erläutert. Ein Beispiel kann hier die Wertschöpfung beim Axialflussmotor sein: Durch die erhöhten Anforderungen an die Produktionsprozesse des Rotors und des Stators steigt die Wertschöpfung, wobei die Materialkosten, speziell durch den verminderten Einsatz von Permanentmagneten, etwas sinkt. Da der Fokus für Baden-Württemberg jedoch auf der Wertschöpfung ohne Materialkosten liegt, ist mit einer starken Veränderung der Wertschöpfung im Gegensatz zu PSM, ASM und FSM zu rechnen.

bel, Steckverbinder und Kühlschleifen zu minimieren. Ein weiterer Treiber dieses Trends ist eine verbesserte Abschirmtechnik und die damit verbundene bessere elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der Komponenten. Die volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte kann durch die Reduktion der Komplexität sowie der Anzahl und Größe der Komponenten (z. B. Invertergehäuse, geschirmte Anschlusskabel) deutlich gesteigert werden. Plattformstrategien der Erstausrüster (OEM – Original Equipment Manufacturer), wie z. B. die Volkswagen MEB Plattform, spiegeln diesen Trend zunehmend wider.

Je nach Integrationsgrad werden drei unterschiedliche Integrationskonzepte unterschieden (siehe Abbildung 22). Bei der Halbintegration sind Motor und Getriebe integriert. Als vorteilhaft gilt hier, dass auf ein breites Spektrum an Lieferanten zurückgegriffen werden kann und verschiedene Varianten einfach umgesetzt werden können. Nachteilig sind jedoch die vom E-Motor separierte Leistungselektronik sowie die mehrfach benötigten Kühlsysteme bzw. Anschlüsse an das Kühlsystem. Darüber hinaus können Hochvolt-(HV-)Wechselstrom-Leitungen und -Anschlüsse Probleme hinsichtlich der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) verursachen, die durch eine Integration vermindert werden können.

Bei der Vollintegration sind E-Motor, Getriebe, Leistungselektronik und HV-Anschlüsse in einer kompakten Anordnung integriert. Somit benötigen E-Motor sowie Leistungselektronik nur eine zentrale Kühlmittelversorgung und es besteht ein geringes Risiko von EMV-Problemen. Nachteilig sind jedoch die aktuell eingeschränkte Lieferantenauswahl und eine erschwerte Variantenbildung.

Die Achsintegration bezeichnet eine Vollintegration einschließlich der Achskomponenten, wie z. B. Antriebswelle, Radaufhängung und Bremsen. Sie kann beim Lieferanten vormontiert und endmontagebereit geliefert werden. Weitere wesentliche Vorteile eines integrierten Systems gegenüber der Einzelintegration der Komponenten sind ein validiertes Gesamtsystem (Mühlberg, et al., 2017). E-Achsen werden vorzugsweise für die Antriebskonzepte BEV, FCEV und PHEV eingesetzt. PKW mit geringerem Elektrifizierungsgrad wie Mikro-, Mild- und Voll-HEV besitzen in der Regel eine wesentlich geringere elektrische Antriebsleistung. Dadurch ergibt sich gleichzeitig ein geringerer Platzbedarf gegenüber voll-elektrischen Fahrzeugen, sodass der elektrische Antrieb in den konventionellen Antriebsstrang mit Verbrennern integriert werden kann (Reif, et al., 2012).



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 21: Technologietrends und deren Auswirkungen auf die Wertschöpfung

¹ Auswirkungen berücksichtigen Steigerung, Verlust oder Verschiebung der Wertschöpfung

Trend 1 – Systemintegration: Die strukturelle Integration des E-Motors, des Inverters und des Getriebes haben das Ziel, Kosten und Platz- und Antriebsstrangverluste durch Ka-

Halbintegration	Vollintegration	Achsenintegration
<p>Teilintegration von E-Motor und Getriebe</p> <ul style="list-style-type: none"> + Ausgeprägtes Lieferantenset und einfache Variantenbildung - Leistungselektronik getrennt von E-Motor platziert - Mehrere Kühlungssysteme notwendig - HV-AC-Leitungen und -Anschlüsse können EMV-Probleme verursachen 	<p>Integration von E-Motor, Getriebe, Leistungselektronik und HV-Anschlüssen</p> <ul style="list-style-type: none"> + Sehr kompaktes Package möglich + Gemeinsame Kühlung für E-Motor und Leistungselektronik + Geringere EMV-Probleme - Lieferantenset und Variantenbildung beschränkt 	<p>Vollintegration einschließlich Achskomponenten, wie z.B. Antriebswelle, Radaufhängung und Bremsen</p> <ul style="list-style-type: none"> + Bereit für Endmontage 

Quelle: Halbintegration: Schaeffler AG, Vollintegration: Robert Bosch GmbH, Achsenintegration: ZF Friedrichshafen AG

Abbildung 22: Achsintegrationsstufen

Trend 2 – Axialflussmotor: Neben den beschriebenen E-Motor-Bauarten für Traktionsmotoren gibt es auch das E-Motor-Konzept des Axialflussmotors, das potenziell hohe Leistungsdichten und geringen Platzbedarf verspricht. Im Gegensatz zu den derzeit hauptsächlich in Anwendung befindlichen Radialflussmotoren wie PSM, ASM und FSM ist die Magnetfeldausrichtung hier axial angeordnet. Der Motor besteht dabei aus einem Rotor mit Permanentmagneten und einem Stator mit Kupferwicklungen, diese sind als Scheiben entlang einer Welle jeweils abwechselnd angeordnet. Infolge des axialen Aufbaus kann der Einsatz der Materialien stark reduziert werden. Das Gehäuse, das bei dieser Bauart keine Kräfte aufnehmen muss, sondern nur die Aufgabe besitzt, den Motor in Position zu halten, kann dabei nicht nur sehr dünn gestaltet werden – aufgrund des im Vergleich zur Motorgröße sehr großen Rotordurchmessers kann auch ein sehr hohes Drehmoment bei geringerem Materialeinsatz von Magneten und Wickeldraht bei sehr geringem Rastmoment erzielt werden. Aktuell gibt es jedoch aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Formgebung und die Produkti-

on dieses Motortyps keinen Einsatz in der Serienproduktion. Ein erster Einsatz wird frühestens ab dem Jahr 2025 im Rahmen von Sonderanwendungen oder bei Sportwagen in Kleinserien erwartet (Dunkermotoren GmbH, 2018).

Trend 3 – Induktiver FSM: Bei FSM wird der Rotorstrom mittels Bürsten und Schleifringen übertragen. Die mechanische Verbindung erhöht den Verschleiß und verringert den Wirkungsgrad. Mit der neuen Technologie wird der Rotorstrom durch Induktion übertragen. Dies reduziert die Nachteile des FSM und macht die FSM-Technologie wettbewerbsfähiger gegenüber PSM für Automobilanwendungen. Verschiedene Ankündigungen von E-Motoren-Herstellern, Ausrüstungslieferanten und Forschungseinrichtungen unterstreichen zwar die Relevanz dieses Trends, jedoch gibt es bisher keine Industrialisierung am Markt. So hat die BRUSA Elektronik AG bereits 2014 ein marktreifes Produkt angekündigt, jedoch Stand 2020 noch nicht im Produktportfolio. Aufgrund des geringen Marktanteils des FSM im Bereich der Traktionsmotoren konzentrieren sich viele E-Motoren-Her-

steller auf die PSM-Technologie und haben die induktive FSM daher noch nicht in ihr Produktportfolio implementiert.

Trend 4 – Höhere Drehzahlen: Aktuelle Traktions-E-Motoren haben eine maximale Drehzahl von 10.000–20.000 U/min. Eine höhere Leistungsdichte kann durch höhere Motordrehzahlen in Verbindung mit einer höheren Getriebeuntersetzung erreicht werden. Hauptanwendungen sind Traktionsmotoren, bei denen das geringere Gewicht den Gesamtenergieverbrauch des Fahrzeugs verringert. So können höhere Drehzahlen von 30.000 U/min das Gewicht des Antriebsstrangs um bis zu 30% reduzieren. Die gesteigerte Effizienz des Fahrzeugs erhöht darüber hinaus dessen Reichweite. Als Herausforderungen bei höheren Drehzahlen gelten das sog. NVH-Verhalten (Geräusch, Vibration, Rauigkeit, engl. Noise Vibration Harshness), der Motorwirkungsgrad, Hochgeschwindigkeitslager und die Getriebekonstruktion, die eine spezielle Auslegung auf die erhöhte Maximaldrehzahl benötigen. Bei E-Motoren-Herstellern und E-Fahrzeug-Herstellern lässt sich ein klarer Trend hin zu höheren Drehzahlen feststellen (z. B. Tesla Model 3: 18.000 U/min).

Trend 5 – Neue Kühlkonzepte: Aufgrund des Entwicklungstrends hin zu kompakteren E-Motoren erhöhen sich neue Anforderungen an das Thermomanagement. Bei vergleichbarer in Wärme umgewandelter Verlustleistung verringert sich die dafür verfügbare Kühlfläche. Ziel ist es, die Wärme möglichst nah an den emittierenden Komponenten Rotor und Stator abzuführen. Dies kann z. B. durch direkte Kühlung der Wickelköpfe, durch Rotorinnenkühlung oder die Verwendung von besonders wärmeleitfähigen Materialien erfolgen. Der Trend zu neuartigen Kühlkonzepten steht in starker Abhängigkeit zum Trend zu höheren Drehzahlen.

Trend 6 – Flachdrahtwellenwicklung (Continuous Hairpin): Durch den Einsatz einer Flachdrahtwellenwicklung ist eine Verringerung des Kupfergewichts im Stator möglich. Denn bei der Flachdrahtwellenwicklung entfällt ein Großteil der Verschweißungen an den Wickelköpfen, wodurch die Wickelköpfe kompakter ausfallen und weniger Kupferdraht benötigt wird. Dadurch kann eine Verbesserung der Leistungsdichte ermöglicht werden. Zusätzlich entfällt der Produktionsschritt für die Kontaktierung. Die Herausforderung liegt in der Industrialisierung des vergleichsweise komplexen Einlegens des vorgeformten Drahts in die Statornuten. Eine der ersten Implementierungen der Technologie wurde für das Jahr 2021 von Lucid in einem PSM bereits angekündigt.

Hohldrähte

Bei Anwendung dieser Technologie wird Kühlflüssigkeit direkt durch hohle Statorwicklungsdrähte gepumpt. Dabei sind eine verbesserte Kühlung sowie eine erhöhte Dauerleistung und Leistungsdichte möglich. Aufgrund eines erhöhten Drahtdurchmessers sind geänderte Wickelprozesse sowie verschiedene Prozesse nach dem Wickeln und der Endmontage nötig. Aktuell findet diese Technologie lediglich in Nischenmärkten, wie beispielsweise der Luftfahrt, Anwendung. Eine Industrialisierung der Technologie ist noch nicht erfolgt.

Komprimierte Wicklung

Bei den sog. Compressed Windings werden die Drähte bei der Einzugswicklung komprimiert, um einen ähnlichen Kupferfüllfaktor wie beim Hairpin-Design zu erzielen. Theoretisch lassen sich so niedrigere Produktionskosten bei höheren Produktionsstückzahlen erzielen. Aktuell befindet sich die Technologie noch in der Testphase und eine Marktreife wird nicht vor dem Jahr 2025 erwartet. Aktuelle Herausforderungen liegen beispielsweise in der Prozesssicherheit, da die Isolation beim Komprimieren nicht beschädigt werden darf.

Hochtemperaturisolierung

Ziel ist eine Verbesserung der Isolation durch Verwendung von Hochtemperatur-Isolationsmaterialien. Der Einsatz dieser Materialien ermöglicht eine Erhöhung der Betriebstemperatur auf über 200 °C, sodass mehr Flexibilität beim Thermomanagement erzielt werden kann. Bei der Erhöhung der Betriebstemperatur im PSM muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Magnetzusammensetzung darauf abgestimmt werden muss. Dafür müsste in den aktuell führenden Magnetzusammensetzungen der Anteil des vergleichsweise teuren Elements Dysprosium erhöht werden. Aus Kostengründen wird der Trend daher mit einer geringen Marktdurchdringungsfähigkeit bewertet.

Verbesserte Magnete

Eine Verbesserung der Magnete des PSM und eine damit mögliche Reduzierung der verwendeten schweren seltenen Erden wie Dysprosium ermöglicht eine Kostensenkung. Darüber hinaus treibt die Abhängigkeit der OEMs von China als Lieferant der seltenen Erden sowie die Preisvolatilität der Seltenerd-elemente diesen Trend voran. Aktuell gibt es jedoch keine offiziell bekannten Bestrebungen seitens der OEMs oder Tier-1-Liefe-

ranten für die weitere Umsetzung dieses Trends. Der Einfluss auf die Produktion wird darüber hinaus als gering eingeschätzt.

800- bis 1.000-V-Architektur

Der Großteil der aktuellen Elektrofahrzeuge basiert auf einer 400-V-Architektur. Aufgrund höherer Effizienz und höherer möglicher Ladeleistung entwickeln PKW-Hersteller vermehrt Fahrzeuge und Plattformen mit 800- bis 1000-V-Architekturen. Das erste Serienfahrzeug mit dieser Technologie ist der Porsche Taycan, weitere Fahrzeuge wurden bereits angekündigt, beispielsweise von Porsche, Audi und Hyundai. Die aus der veränderten Architektur resultierende erhöhte Betriebsspannung des E-Motors hat jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Wertschöpfung, da die Komponenten ähnlich dimensioniert werden und die Produktionsprozesse gleich bleiben. Lediglich die Isolierung der Wicklung, die Kontaktierung und das Wicklungsdesign müssen an das höhere Spannungsniveau angepasst werden.

Verbesserte Nütisololation

Die Verwendung von Papier oder Folie als Isolation zwischen Statornut und Wicklung erfordert einen aufwendigen Fertigungs- und Einschubprozess. Daher wird aktuell die Verwendung anderer Materialien beziehungsweise auch ein Entfall der Isolation durch eine Verbesserung der Beschichtung des Wickeldrahts erforscht. Sollte die Isolation durch andere Materialien ausgeführt werden, wird erwartet, dass eine Verschiebung der Wertschöpfung hin zu anderen Lieferanten und einem abgewandelten und vereinfachten Produktionsprozess erfolgt. Sollte aufgrund einer Verbesserung der Isolation des Wickeldrahts die zusätzliche Isolation entfallen können, würde dies zu einer Minderung der Wertschöpfung in der Produktion aufgrund des Entfalls eines gesamten Produktionsprozesses führen.

2.3.2. Implikationen für E-Motoren und Subkomponenten

Eine Bewertung der Technologietrends hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Wertschöpfung ergibt einen potenziellen Wertschöpfungsverlust für vier der sechs wahrscheinlichsten Trends: die Systemintegration, höhere Drehzahlen, neue Kühlkonzepte sowie die Flachdrahtwicklung. Eine Ausnahme bildet hier der mögliche Technologiesprung zu einem Axialflussmotor. Beim Konzept des Axialflussmotors wird erwartet, dass die Wertschöpfung im Gegensatz zu einem PSM vom eingesetzten Material zu erhöhten Produktionskosten aufgrund des komplexen Aufbaus wechselt. Beim induktiven FSM hingegen wird erwartet, dass nur eine Verschiebung der Wertschöpfung stattfindet. Die detaillierten Auswirkungen auf die Komponenten und den gesamten E-Motor werden im Folgenden für jeden der sechs Trends erörtert.

Trend 1 – Systemintegration: Die oben beschriebene strukturelle Integration des E-Motors, des Inverters, des Getriebes und der Achskomponenten hat das Ziel, Kosten, Platz- und Antriebsstrangverluste durch Kabel, Steckverbinder und Kühlschleifen zu minimieren. Materialeinsatz wird hierbei nicht nur durch die Integration in ein Gehäuse, durch eine einheitliche Kühlung für das Gesamtsystem oder durch kurze Kabelwege minimiert. Eine Systemintegration ermöglicht es auch, Produktionsprozesse im Rahmen der Endmontage zusammenzufassen oder diese teilweise komplett entfallen zu lassen.

Trend 2 – Axialflussmotor: Durch den axialen Aufbau können der Materialeinsatz für Gehäuse und Permanentmagnete sowie die Kupfermenge in den Wicklungen des Stators bei gleicher Leistung stark reduziert werden. Im Gegensatz zu den materialeitigen Einsparungen wird jedoch ein erhöhter Aufwand bei der Produktion des Motors aufgrund der

komplexen Formgebung von Rotor und Stator und der Verarbeitung der dünnenschichtigen Permanentmagnete erwartet.

Trend 3 – Induktiver FSM: Bei der heutigen Bauform des FSM wird der Rotorstrom durch Bürsten und Schleifringe übertragen. Bei der Technologie des induktiven FSM wird der Rotorstrom durch Induktion übertragen. Aus heutiger Sicht findet durch diesen Technologiewechsel keine Minderung der Wertschöpfung statt, vielmehr werden die entfallenden Komponenten wie Bürsten und Schleifringe durch die Komponenten zur induktiven Stromübertragung ersetzt. Auch im Produktionsprozess entfällt keine Wertschöpfung, es kommen lediglich geänderte Produktionsprozesse zur Anwendung.

Trend 4 – Höhere Drehzahlen: Eine höhere Leistungsdichte kann durch höhere Motordrehzahlen in Verbindung mit einer höheren Getriebeuntersetzung erreicht werden. Durch die im Trend beschriebene höhere gravimetrische sowie volumetrische Leistungsdichte wird es möglich, kleinere und leichtere E-Motoren bei gleichen Leistungsparametern einzusetzen. In diesem Fall ergibt sich eine Minderung der Wertschöpfung vor allem durch die Einsparung an Material. Die Produktionsprozesse werden größtenteils nicht beeinflusst, da eine Auslegung auf höhere Drehzahlen den grundlegenden Produktionsablauf nicht beeinflusst, sondern nur geringfügige Prozessanpassungen mit sich bringt.

Trend 5 – Neue Kühlkonzepte: Wie im Rahmen der Technologietrends beschrieben, kann durch den Entfall der Mantelkühlung und die Verwendung besonders wärmeleitfähiger Materialien die volumetrische Leistungsdichte eines E-Motors gesteigert werden. Die gravimetrische Leistungsdichte kann durch Verwendung leichterer Materialien (z. B. Ersetzen von Metall durch Kunststoff) erhöht werden. Darüber hinaus lässt sich durch den Einsatz kostengünstiger Materialien und eine entsprechende Anpassung der Produktionstechnologie eine Kostenreduzierung realisieren.

Trend 6 – Flachdrahtwellenwicklung: Durch den Einsatz einer Flachdrahtwellenwicklung vergleichbar mit dem Hairpin, aber ohne zusätzlich notwendige Kontaktierung, ist eine Verbesserung der volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte möglich. Dabei ergibt sich neben der Reduzierung der Materialkosten infolge des geringeren Materialeinsatzes und im Gegensatz zu Standard-Hairpin-Wicklungen auch ein Kostenvorteil in der Produktion durch den Entfall der Produktionsschritte für die Kontaktierung der Hairpins.

2.4. E-Motoren in Nutzfahrzeugen

Um einen vollständigen Überblick über die Marktpotenziale im Bereich E-Motoren zu geben, werden im folgenden Exkurs Traktionsmotoren für Nutzfahrzeuge und mögliche Synergien zu elektrisch angetriebenen PKW auf technischer Basis analysiert. Der Markt für elektrifizierte Nutzfahrzeuge wird dabei weltweit, aber vor allem auch in Deutschland in den kommenden Jahren stark an Bedeutung gewinnen. Für den schweren Straßengüterverkehr wurde im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung das Ziel formuliert, dass bis 2030 etwa ein Drittel der logistischen Fahrleistung elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe erbracht werden soll (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – BMVI, 2020). In der nachfolgenden Analyse soll neben unterschiedlichen Anforderungen an E-Motoren für Nutzfahrzeuge und PKW vor allem auf den technischen Aufbau und die Produktion eingegangen werden. Außerhalb dieses Exkurses werden Nutzfahrzeuge im Rahmen dieses Themenpapiers nicht weiter behandelt.

2.4.1. Technologiebewertung E-Motoren in Nutzfahrzeugen

Der Trend zur Elektrifizierung von Antriebssträngen bezieht sich neben PKW auch auf kommerzielle Nutzfahrzeuge. Diese werden basierend auf der maximalen Zuladung und ihrem Einsatzspektrum in die Kategorien Light-Duty, Medium-Duty und Heavy-Duty bzw. Heavy-Duty Longhaul Truck unterschieden. Hierbei haben die unterschiedlichen Anforderungen in den jeweiligen Kategorien sowohl einen Einfluss auf die technischen Spezifikationen als auch auf das Design des zum Einsatz kommenden E-Motors. Dies gilt auch für das Integrationslevel der Antriebsperipherie des Motors. In der Kategorie Light-Duty mit einem Gesamtgewicht bis zu 3,5 Tonnen, wie z. B. dem eSprinter von Mercedes-Benz, kommen primär E-Motoren aus dem PKW-Bereich zum Einsatz. In den Kategorien Medium- und Heavy-Duty sind vor allem die Leistungsanforderungen hinsichtlich der Nutzlast und des Gesamtgewichts für die E-Motor-Spezifikationen ausschlaggebend. Im Bereich Longhaul (Langstrecken-Nutzfahrzeuge) unterscheidet sich der Antriebsstrang lediglich in der Dimensionierung des Energiespeichers vom Heavy-Duty-Bereich, um eine Langstreckentauglichkeit zu ermöglichen.

	System-integration	Axialflussmotor	Induktiver FSM	Höhere Drehzahlen	Neue Kühlkonzepte	Kontinuierliche Hairpin-Wicklung
Wertschöpfung gesteigert		●				
Wertschöpfung verschoben			●			
Wertschöpfung entfallen	●			●	●	●

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 23: Technologietrends und deren Implikationen für die Wertschöpfung

Hinsichtlich der Spezifikationen des E-Motors beziehen sich die wesentlichen Unterschiede im Nutzfahrzeugsbereich auf das benötigte maximale Drehmoment, das in einem bestimmten Drehzahlenspektrum anliegt. So haben durchschnittliche PKW-E-Motoren aktuell eine maximale Drehzahl zwischen 10.000 und 20.000 U/min mit im Vergleich geringem Drehmoment. Drehmomentstarke E-Motoren für Nutzfahrzeuge erreichen hingegen lediglich zwischen 3.000 und 5.000 U/min und ein weitaus höheres Drehmoment. Um die hohen Drehmomentanforderungen im Nutzfahrzeugsbereich realisieren zu können, bedarf es vor allem eines großvolumigen Designs des E-Motors.

Im LKW-Segment werden am Markt aktuell als Traktionsmotoren meist ASM und PSM eingesetzt. Die maximale Leistung bleibt gegenüber einem im PKW eingesetzten E-Motor fast unverändert. So hat beispielsweise ein E-Motor im Tesla Model 3 bei einem Gewicht von 90 kg eine maximale Leistung von 190 kW, wodurch sich ein Leistungsge-
wicht von 2,1 kW/kg ergibt. E-Motoren für durchschnittliche Medium-Duty Trucks haben ebenfalls eine Leistung von etwa 200 kW, jedoch ein deutlich höheres Motorgewicht von mehr als 200 kg. Somit liegt die Leistungsdichte mit 1 kW/kg deutlich unter dem eines elektrisch angetriebenen PKW.

Ein weiteres Differenzierungsmerkmal ist das Integrationslevel von PKW-E-Motoren und elektrischen Nutzfahrzeugen. Der Trend hin zu einem vollintegrierten E-Motor samt Inverter und Getriebe, wie bereits im Kapitel 2.1.3 am Beispiel der MEB-Plattform von Volkswagen beschrieben, ist im Bereich der Nutzfahrzeuge aktuell noch nicht zu beobachten. Die derzeit von E-Motoren angetriebenen Nutzfahrzeuge im Medium- und Heavy-Duty-Bereich basieren auf den von Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugplattformen und bieten daher nur erschwert die Möglichkeit einer Integration.

2.4.2. Ableitung von Synergieeffekten zwischen den Marktsegmenten

Die Prozessschritte bei der Produktion von LKW-Motoren sind denen von PKW-Motoren sehr ähnlich. Die wesentlichen Unterschiede liegen in der produzierten Stückzahl und der damit einhergehenden Automatisierung. Während PKW-E-Motoren bei über 100.000 produzierten Einheiten auf einer vollautomatisierten und verketteten Linie gefertigt werden, liegen die Stückzahlen bei LKW-Motoren aktuell bei unter 20.000 Stück p.a., wofür teilautomatisierte Einzelprozesse (Gruppenfertigung) üblich sind. Zusätzlich wirken sich um den

Faktor drei bis fünf höheres Gewicht und höheres Volumen der LKW-Motoren auf die Auslegung der Anlagen aus. Diese müssen wesentlich größer und robuster konzipiert sein.

Synergieeffekte mit PKW-Anwendungen können demnach erst dann umfangreich genutzt werden, wenn die Stückzahlen der LKW-E-Motoren steigen oder sich der Trend zu kleineren und höher drehenden Motoren fortsetzt und Gleichteile für die unterschiedlichen Anwendungen genutzt werden können. Zu den potenziellen Synergieeffekten zählen die gemeinsame Nutzung von Material-, Komponenten- und Systemlieferanten, mit denen Reichweite und Produktdurchdringung entsprechend skaliert werden können. Erste Entwicklungen hin zu kleineren E-Motoren bei LKW-Anwendungen zeichnen sich ab. Tesla kündigte bereits an, in seinem Heavy-Duty Truck Semi mehrere Antriebseinheiten des PKW Tesla Model 3 einzusetzen. Es ist zu erwarten, dass weitere LKW-Hersteller diesem Trend folgen.



3.

Weltweiter Markt für E-Motoren in Automobilanwendungen bis 2030

Der weltweite Markt für E-Motoren bei PKW wird vor allem durch den zunehmenden Anteil elektrifizierter Funktionen, eine steigende Zahl an Fahrzeugneuzulassungen im PKW-Segment sowie die Elektrifizierung des Antriebsstrangs beeinflusst. Im Folgenden werden daher neben den prognostizierten¹ globalen Fahrzeugneuzulassungen bis 2030 auch die Bedarfe für E-Motoren in Abhängigkeit von Antriebstopologie und Ausstattungsvariante untersucht. Die daraus abgeleiteten jährlich produzierten Stückzahlen in den einzelnen Anwendungsgebieten werden anschließend mit den durchschnittlichen Kosten inkl. Gewinnmargen multipliziert, um das Marktpotenzial für E-Motoren zu prognostizieren.

- Die Analyse des weltweiten PKW-Marktes zeigt eine **starke Marktdurchdringung der E-Mobilität mit einem Anteil von 82% xEV bis 2030**. Dabei werden voraussichtlich Mild- oder Micro-Hybrid-Fahrzeuge (MHEV) den größten Anteil mit ca. 43% Marktanteil ausmachen, gefolgt von rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen (BEV) mit einem Marktanteil von 23%.
- Durch die starke Zunahme der xEV-Zulassungen ergeben sich weltweit und für Baden-Württemberg erhebliche Marktpotenziale im Bereich E-Motoren. So wird das **weltweite Marktpotenzial, das mit elektrischen Traktionsmotoren erwirtschaftet werden kann, auf 22,02 Mrd. € für das Jahr 2030 prognostiziert**. Dabei nehmen die elektrischen Traktionsmotoren jedoch stückzahlmäßig nur einen kleinen Teil der in PKWs verbauten E-Motoren von ca. 2,7% im Jahr 2030 ein. Das gesamte Marktpotenzial durch E-Motoren im PKW-Segment wird hingegen ca. 44 Mrd. € betragen. Somit entfällt etwa die Hälfte des weltweiten Marktpotenzials auf Traktionsmotoren.
- Das Marktpotenzial im Rahmen der Herstellung von Traktionsmotoren teilt sich gemittelt in **70% Materialkosten inkl. Halbzeugen wie Wickeldraht oder Permanentmagneten und 30% Produktionskosten**, die im Weiteren als potenzielle Wertschöpfung für das Land Baden-Württemberg betrachtet werden.

3.1. Bedarfe und Marktentwicklungen im automobilen Sektor

Die Entwicklung der globalen Fahrzeugneuzulassungen wird hauptsächlich von der Nachfrage innerhalb der Absatzmärkte definiert. Die Aufteilung des Marktes hinsichtlich der Antriebstopologie resultiert wiederum primär aus den jeweiligen CO₂-Regularien innerhalb der Märkte und beeinflusst die Elektrifizierungsstrategien der OEMs. Diese externen Regularien unterliegen aber aufgrund der zum Teil begrenzten Vorhersehbarkeit einer gewissen Volatilität. Im folgenden Abschnitt wird daher die globale Entwicklung der Fahrzeugneuzulassungen sowie die Aufteilung des Marktes hinsichtlich der Antriebstopologie der Fahrzeuge auf Basis der aktuellen Regularien aufgezeigt.

3.1.1. Prognose der globalen Fahrzeugneuzulassungen bis 2030

Als Grundlage für die Prognose von Bedarfen und Marktentwicklungen für E-Motoren im Automobilssektor dient die erwartete Entwicklung elektrifizierter Antriebstechnologien basierend auf den Fahrzeugneuzulassungen bis 2030. Diese wurden anhand regionaler Flottenvorgaben in den Kernmärkten Europa, China und Nordamerika sowie einer Prognose für den Rest der Welt (ROW) kalkuliert.

In einem ersten Schritt wurden die durchschnittlichen Flottenemissionen im Basisjahr 2020 je OEM und Kernmarkt errechnet. Als Berechnungsgrundlage dienen die jährlichen Neuzulassungen eines OEM je Fahrzeugsegment und Antriebstopologie sowie deren durchschnittlicher CO₂-Ausstoß. Anschließend erfolgte die individuelle Berechnung der Flottenemissionsziele je OEM im Zielkorridor bis 2030. Dies ist erforderlich, da Flottenziele maßgeblich von weiteren

marktspezifischen Fahrzeugparametern abhängen. So ist beispielsweise in Europa und China das Fahrzeuggewicht für die Berechnung der Flottenemissionsziele des jeweiligen OEM relevant, wohingegen in Nordamerika die Fahrzeugaufstandsfläche der wesentliche Parameter für die Berechnung ist.

Des Weiteren wurde kalkuliert, wie viele Fahrzeuge mit elektrifizierten Antriebstechnologien ein OEM in den Kernmärkten absetzen muss, um die individuellen CO₂-Ziele zu erreichen. Um jeden OEM mit höchstmöglichem Detailgrad zu simulieren, wurden individuelle Elektrifizierungsroadmaps mit Fahrzeugankündigungen und Auslieferungsstarts berücksichtigt. Die meisten OEMs versuchen, die Flottenvorgaben über einen Mix aus verschiedenen Antriebstopologien zu erfüllen, beispielsweise über MHEV-, PHEV- und BEV-Verkäufe. Manche OEMs verfolgen jedoch kurzfristig die Strategie, besonders hohe Verkaufsanteile einer bestimmten Topologie zu erzielen. Beispiele hierfür sind Mercedes-Benz und BMW, die zahlreiche Modelle mit der Plug-in-Hybrid-Technologie ausstatten. Durch Berücksichtigung dieser Roadmaps konnte jeder OEM individuell simuliert werden. Zusätzlich wurde die Möglichkeit des „Poolings“ im Marktmodell integriert. Dies bedeutet, dass bestimmte Hersteller ihre Flotten bilanziell zusammenlegen und ein CO₂-Ziel gemeinschaftlich erreichen müssen. Im Normalfall sind hiervon zugehörige OEMs eines Konzerns betroffen, beispielsweise BMW, Mini und Rolls-Royce. Aber auch weitere prominente Beispiele, wie die CO₂-Übereinkunft zwischen Tesla und FCA bzw. Stellantis, können genannt werden. Darüber hinaus wurden sogenannte Supercredits im Marktmodell berücksichtigt. Dabei handelt es sich um Gutschriften für OEMs, die besonders viele Fahrzeuge mit geringen CO₂-Emissionen am Markt absetzen, die dann mehrfach in der Flottenbilanz angerechnet werden können.

¹ | Bewertung der Marktentwicklung auf Datenbasis und Ankündigungen der Fahrzeughersteller in Q1/2021 erfolgt

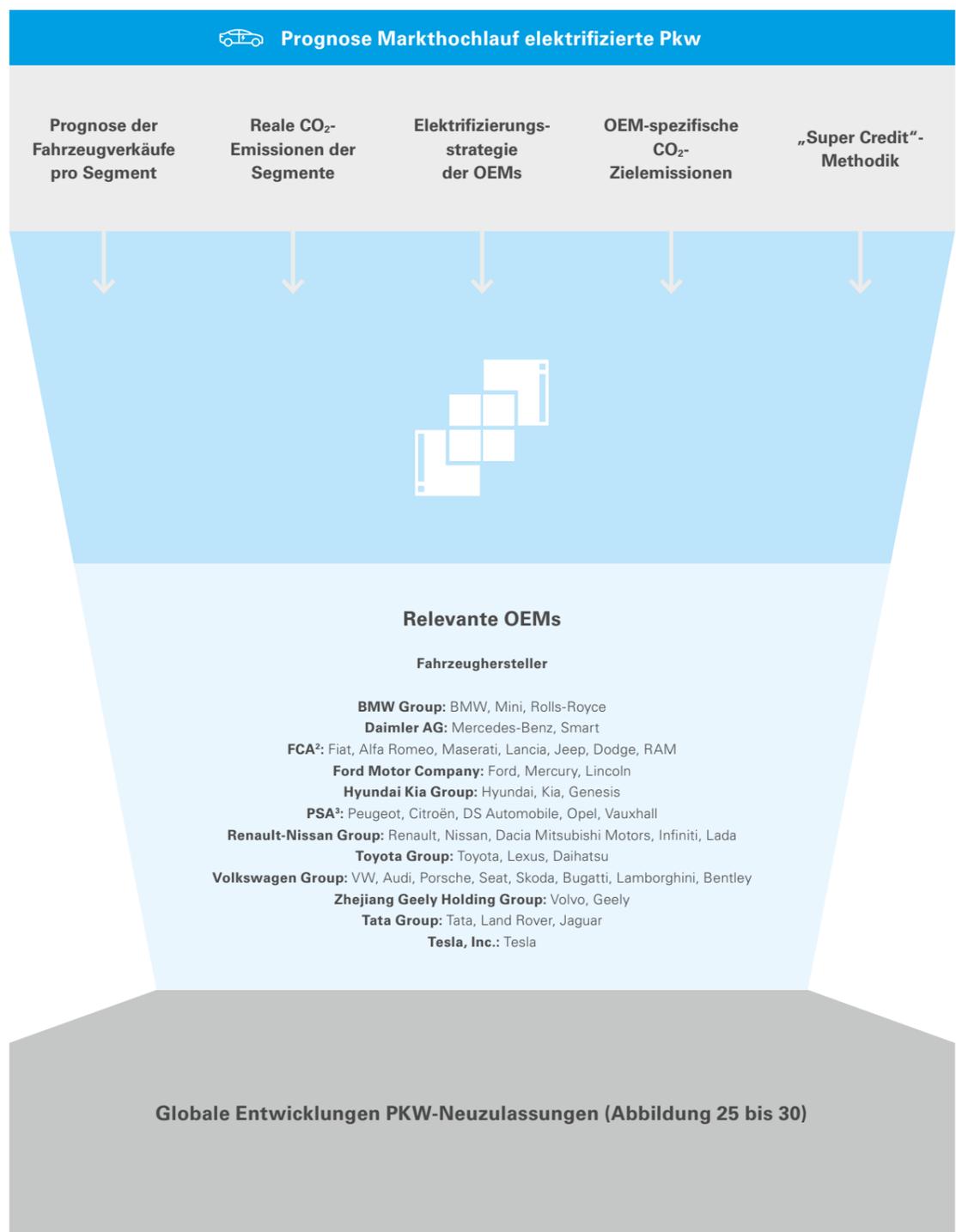


Abbildung 24: Methodik zur Prognose des Markthochlaufs elektrifizierter PKW

Quelle: Eigene Darstellung

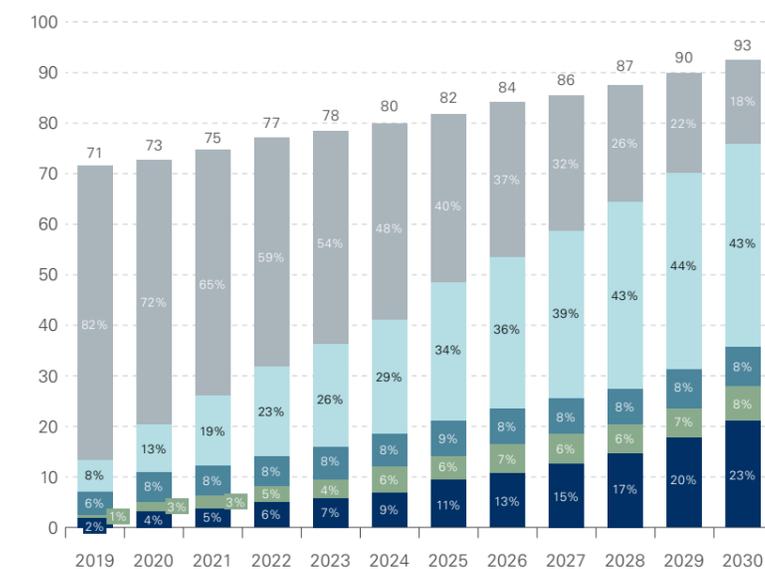
2 | Die Automobilkonzerne PSA und FCA fusionierten am 16. Januar 2021 zu Stellantis.
3 | Die Automobilkonzerne PSA und FCA fusionierten am 16. Januar 2021 zu Stellantis.

Betrachtungsgegenstand dieses Themenpapiers sind alle Personenkraftwagen weltweit. Darunter fallen alle zweispurigen Fahrzeuge, die primär zur Beförderung von maximal neun Personen zugelassen sind. Nicht enthalten sind Nutzfahrzeuge und Leichtkraftfahrzeuge. Eine Ausnahme bildet Nordamerika (USA und Kanada), wo Light-Duty Trucks ebenfalls betrachtet werden. In Nordamerika zählen Pick-up-Trucks zu den Light-Duty Trucks, werden jedoch mehrheitlich als PKW genutzt. Sie werden deshalb in der Berechnung ebenfalls berücksichtigt, um eine Verzerrung der Darstellung auszuschließen.

Im Zuge der stetig zunehmenden Elektrifizierung und weiterer verkündeter Strategien von Fahrzeugherstellern, die teilweise auf die vollständige Umstellung der Fahrzeugflotten auf elektrische Antriebe setzen, stellt die im weiteren Verlauf erarbeitete Marktmodellierung die Entwicklung auf Basis bestehender Regulierungen und der CO₂-Compliance der Fahrzeughersteller dar. Im Rahmen dieses Themenpapiers werden zusätzliche Marktpotenziale aufgrund verbesserter Gesamtkosten Total Cost of Ownership, Abk. (TCO) für den Endkunden sowie von 100%-Umstellungen von Fahrzeugherstellern auf Elektrofahrzeuge, die lediglich auf Ankündigungen beruhen, nicht in Betracht gezogen.

Mit der beschriebenen Methodik konnten folgende Entwicklungen für den globalen Antriebsmix für PKW berechnet werden. Der weltweite Gesamtabsatz von Neufahrzeugen wird von 71 Mio. im Jahr 2019 auf voraussichtlich 93 Mio. im Jahr 2030 steigen. Die Flottenemissionsvorschriften in den wichtigsten Märkten drängen die OEMs zu höheren Marktanteilen elektrifizierter Antriebstechnologien von bis zu 28% im Jahr 2020. Hierbei dominieren vor allem mild- und vollhybride Antriebstechnologien mit einem Anteil von 21%. Reinelektrische Antriebe sind hingegen mit 4% nach wie vor verhältnismäßig gering vertreten. Bis zum Jahr 2030 soll der weltweite Anteil reiner Verbrenner (ICE) auf 18% sinken. 59% der Neuzulassungen sollen durch hybride Antriebskonzepte erbracht werden (MHEV, HEV und PHEV), die somit den größten Marktanteil einnehmen werden. Das Hauptwachstum ist innerhalb des MHEV-Segments zu beobachten, das einen globalen Marktanteil von 43% bis 2028 erreichen wird und seit 2020 ein stetiges Wachstum aufweist. Das zweitgrößte Fahrzeugsegment wird von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) erreicht, für die ein Marktanteil von 23% im Jahr 2030 prognostiziert wird. Das Hauptwachstum dieses Segments wird sich im Vergleich zum MHEV-Segment verzögern und hauptsächlich 2023/2024 einsetzen.

Millionen Fahrzeuge



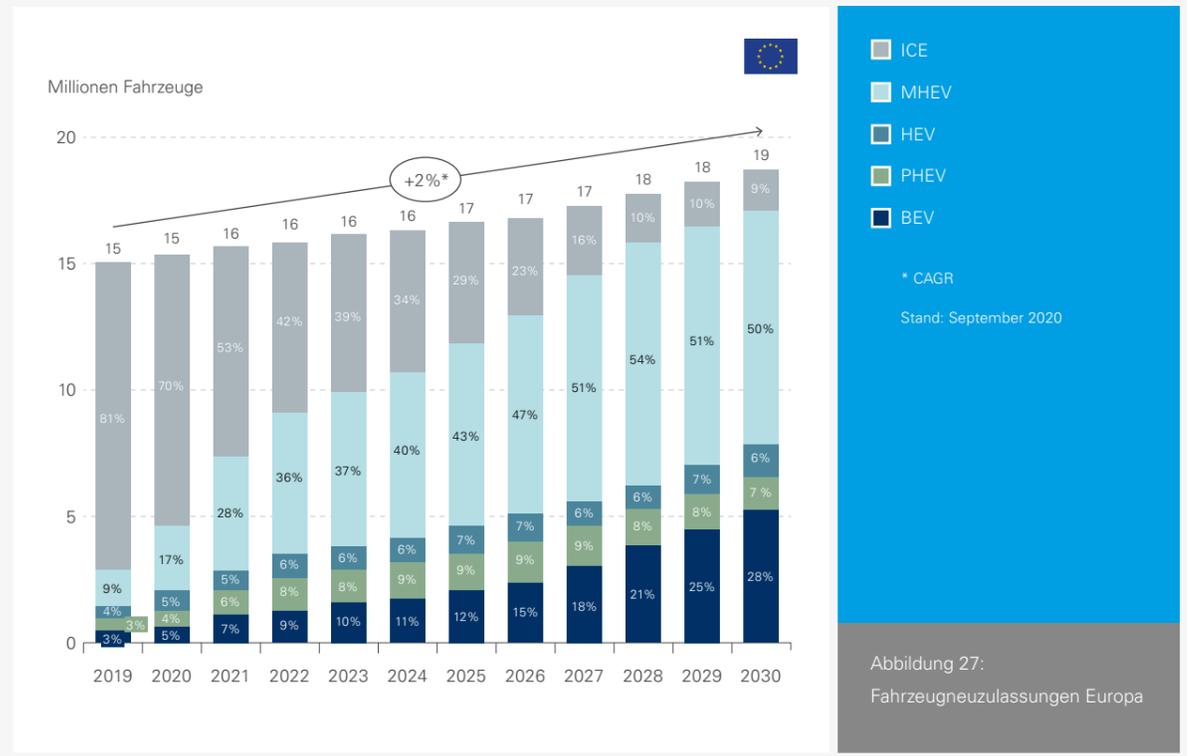
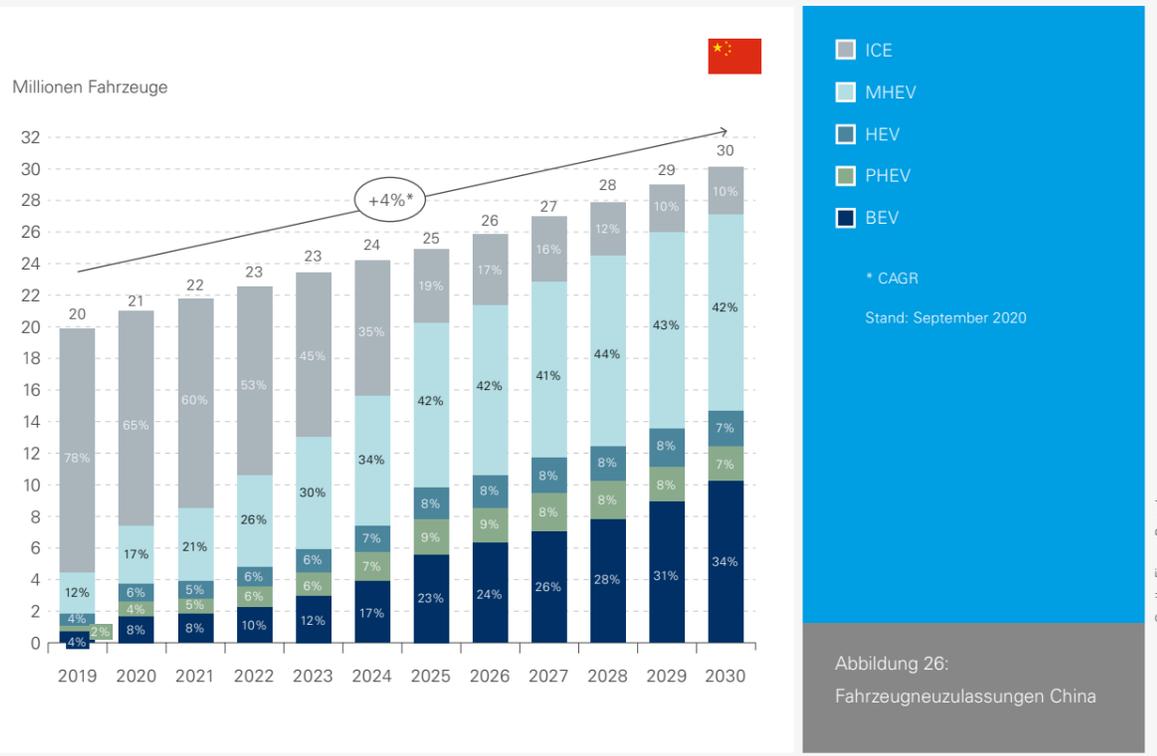
- ICE
- MHEV
- HEV
- PHEV
- BEV

*In Nordamerika zählen Pick-up-Trucks zu den Light-Duty Trucks, werden jedoch mehrheitlich als PKW genutzt und sind somit in der Berechnung ebenfalls berücksichtigt

Stand: September 2020
Die Effekte durch den European Green Deal und kommende Entscheidungen der US-Regierung zum Klimaschutz wurden nicht berücksichtigt.

Abbildung 25: Globale Entwicklung PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart

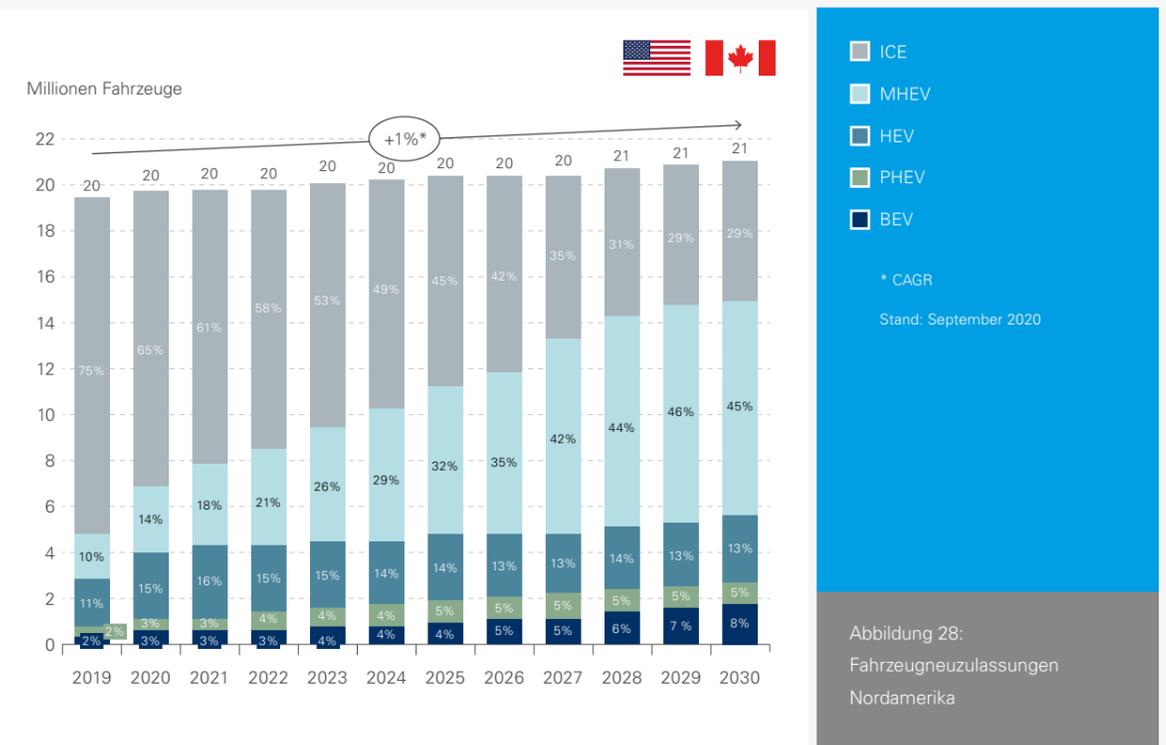
Quelle: Eigene Berechnung



Vergleicht man die regionalen PKW-Neuzulassungen für Europa, Nordamerika, China und den Rest der Welt, wird China im Jahr 2030 als der größte Absatzmarkt für Neufahrzeuge mit 30 Mio. Einheiten pro Jahr und einem jährlichen Wachstum von 4% ausgewiesen. Dabei ist zu erwarten, dass in China im Jahr 2030 lediglich jedes zehnte neu verkaufte Fahrzeug einen reinen Verbrennungsmotor als Antriebsart nutzt. 34% der neuzugelassenen Fahrzeuge werden rein elektrisch angetrieben sein. Mit 42% Marktanteil sind Mild-Hybride (MHEV) jedoch die dominierende Antriebsart.

Europa stellt mit 19 Mio. Neufahrzeugen pro Jahr den kleinsten Kernmarkt dar. Bezogen auf die Antriebsart wird der Neuwagenmarkt im Jahr 2030 neben Mild-Hybriden (MHEV) mit 50% auch von rein elektrischen PKW dominiert (28%). Die Gesamtanzahl der PKW-Neuzulassungen wird mit einem Gesamtwachstum von 2% pro Jahr, ausgehend von aktuell 15 Mio. Neufahrzeugen, nur langsam steigen. Jedoch wird der Anteil elektrifizierter Fahrzeuge mit 91% im Jahr 2030 höher sein als auf dem chinesischen Markt.

Wie in Europa haben in Nordamerika MHEV die größten Zuwachsraten und dominieren mit 45% im Jahr 2030 den zukünftigen Markt. Der Gesamtmarkt Nordamerika hat eine jährliche Wachstumsrate von durchschnittlich 1% und somit die geringste Zuwachsrate. Ähnlich wie im Rest der Welt sind hier im Jahr 2030 noch knapp 30% der neuzugelassenen Fahrzeuge reine Verbrenner. Grund hierfür ist die im März 2020 angepasste CO₂-Verordnung „Safer Affordable Fuel Efficient Vehicles Rule“ (Abk. SAFE), die nur für den Absatzmarkt USA gilt. Ursprünglich verpflichtete diese die Autobauer, eine jährliche Effizienzsteigerung von 5% für die Modelljahre 2021 bis 2026 zu realisieren. Unter der Trump-Administration wurde dieser Wert jedoch auf jährlich 1,5% herabgesetzt, wodurch das erwartete Wachstum für elektrisch angetriebene Fahrzeuge deutlich verlangsamt wird.

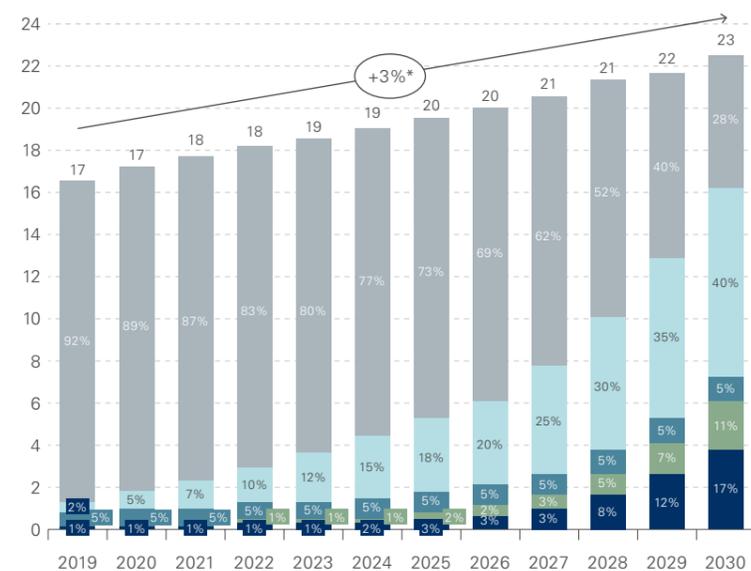


Im Rest der Welt, der mit 23 Mio. Neuzulassungen im Jahr 2030 den zweitgrößten Absatzmarkt nach China darstellen wird, wird der konventionelle Verbrennungsmotor noch bis 2028 mit über 50% Marktanteil sehr dominant sein. Grund hierfür sind fehlende CO₂-Regularien sowie die höhere Preissensitivität der Kunden in weniger wohlhabenden Regionen. Rein elektrisch betriebene Fahrzeuge stellen mit 17% lediglich einen kleinen Teil der Neuzulassungen dar. Dennoch ist der relative Marktanteil mehr als doppelt so groß wie in Nordamerika.

Um eine detailgetreue Abbildung des Marktes zu gewährleisten, wurden bei der Erstellung des Themenpapiers die aktuellen Erkenntnisse mit Stand September 2020 hinsichtlich der Auswirkung der COVID-19-Epidemie auf die globalen Fahrzeugneuzulassungen sowie den Markthochlauf von E-Fahrzeugen bis 2030 berücksichtigt. Dabei zeichnet sich aktuell eine durchschnittliche Reduzierung der Fahrzeugneuzulassungen von ca. 30% auf 51 Mio. Einheiten gemittelt über die Märkte für das Jahr 2020 ab. Diese Entwicklung wird aktuell von den Unternehmensberatungen Bain & Com-

pany, Roland Berger und Boston Consulting Group geteilt (Stricker, et al., 2020), (Mogge, 2020), (Boston Consulting Group (BCG), 2020). Ausgehend von dieser neuen Ausgangssituation wurden zwei mögliche Szenarien für eine Erholung des Marktes simuliert. Das U-Form-Szenario stellt eine vollständige Markterholung bis 2024 dar. Das Worst-Case-Szenario wird mit einer L-Form abgebildet, bei der das Absatzpotenzial auch nach 2025 unterhalb des ursprünglich prognostizierten liegt. Laut Marktforschung und Analyse früherer Krisen wird das gängigste Auswirkungsszenario das U-förmige Szenario sein, das auch als Hauptszenario in diesem Themenpapier angewendet wird. Es wird erwartet, dass das im U-Form-Szenario charakteristische Erholungsmerkmal bis 2024 eingesetzt haben wird und das volle Marktpotenzial bis dahin wiederhergestellt ist. Der Absatzeinbruch in den Jahren von 2020 bis 2023 stellt jedoch einen unwiederbringlichen Verlust an verkauften Fahrzeugen dar, der in den darauffolgenden Jahren nicht kompensiert werden kann. In diesem Szenario wird erwartet, dass im Jahr 2030 das weltweite PKW-Marktvolumen nach wie vor bei 93 Mio. Neufahrzeugen liegt.

Millionen Fahrzeuge



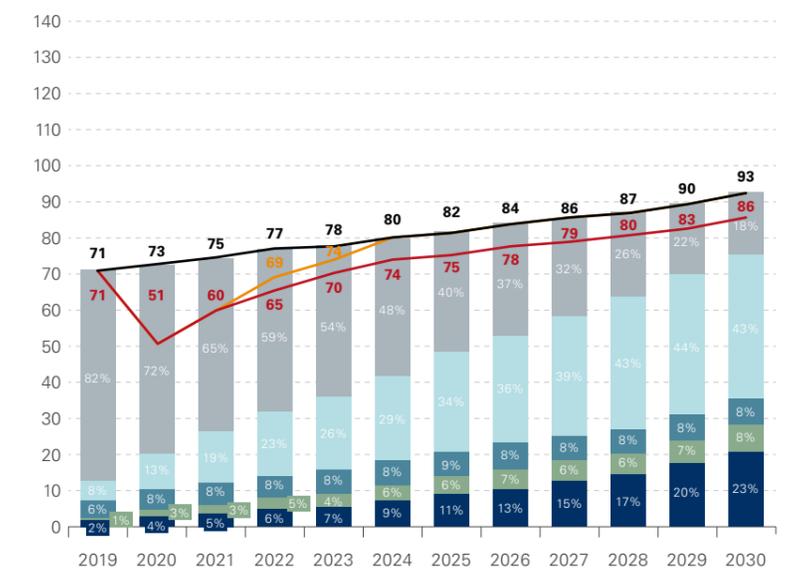
- ICE
- MHEV
- HEV
- PHEV
- BEV

* CAGR
Stand: September 2020

Abbildung 29: Fahrzeugneuzulassungen Rest der Welt (ROW) alle Länder außer China, Europa Nordamerika

Quelle: Eigene Berechnung

Millionen Fahrzeuge



- ICE
- MHEV
- HEV
- PHEV
- BEV
- COVID-19-Einfluss (U-Form)
- COVID-19-Einfluss (L-Form)
- Ursprünglich erwarteter Hochlauf

Abbildung 30: Globale PKW-Fahrzeugneuzulassungen mit COVID-19-Effekt

Quelle: Eigene Berechnung

3.1.2. E-Motoren-Bedarfe nach Antriebstopologie und Ausstattungsvariante

Neben den allgemeinen Prognosen zu Fahrzeugneuzulassungen und den Marktanteilen nach Antriebstopologie bzw. dem Elektrifizierungsgrad wird der Bedarf an E-Motoren durch die Ausstattungsvarianten der produzierten Fahrzeuge bestimmt. Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen den verschiedenen Preiskategorien für PKW ist der Umfang an Komfort- und Fahrdynamikfunktionen. Dieser wiederum bestimmt die durchschnittliche Anzahl verbauter E-Motoren in der jeweiligen Preiskategorie. In Fahrzeugen des Premiumsegments werden beispielsweise aufgrund der umfangreicheren Ausstattung und der fahrdynamischen Funktionen mehr E-Motoren verbaut als bei kostengünstigen Basisfahrzeugen.

Durch diese Segmentierung nach Antriebstopologie und Preiskategorie sollen Verkaufsvolumen pro Fahrzeugsegment für die anschließenden Marktkalkulationen zugrunde gelegt werden. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben, wird hinsichtlich der Antriebstopologie nach konventionellen

Verbrennern (ICE), Mild-Hybriden (MHEV), Vollhybriden (HEV), Plug-in-Hybriden (PHEV) und rein batteriebetriebenen Fahrzeugen (BEV) unterschieden. Bezüglich der Preiskategorie werden Fahrzeuge nach Basis (<18.000 €), Mittel (18.000–30.000 €) und Premium (>30.000 €) unterschieden (s. Abbildung 30). Dabei bezieht sich die Preisauswertung auf ausschließlich durch Verbrennungsmotoren angetriebene Fahrzeuge (ICE) in der Basisausführung und -motorisierung ohne Steuern. Als Datengrundlage wurden die Top 50 der weltweit zugelassenen Fahrzeuge pro Segment im Jahr 2020 analysiert.

Preiskategorie			
Kategorie	Spanne Einstiegspreis [€]	Low end	High end
Basis	< 18.000 €	Dacia Sandero	Toyota Corolla
Mittel	18.000–30.000 €	Honda Civic*	VW Passat
Premium	> 30.000 €	Mercedes C-Klasse	Porsche Cayenne

Segmentierungsvoraussetzungen:
 - Eintrittspreise für die 50 meistverkauften PKW-Modelle pro Markt, analysiert für 2020
 - Preise basierend auf ICE ohne Steuern und basierend auf dem Kernmarkt

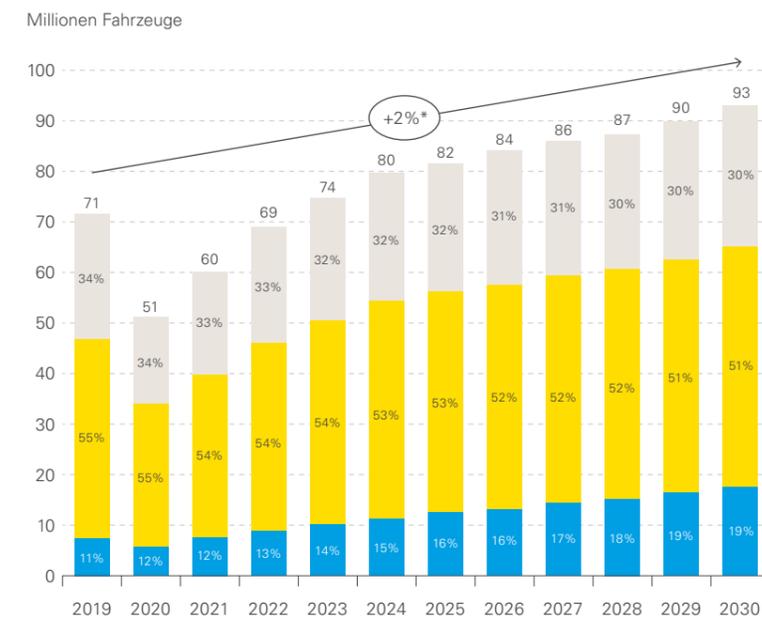
» Hauptunterscheidungsmerkmale von E-Motoren sind Komfort- und Fahrdynamikfunktionen.

Quelle: Abbildungen: Basis: Renault Deutschland AG, Toyota Deutschland GmbH; Mittel: Honda Motor Europe Ltd, VW AG; Premium: Daimler AG, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. *Abbildung exemplarisches Bild entspricht nicht Honda Civic.

Abbildung 31: Segmentierung der Fahrzeuge nach Preiskategorien

Aufgrund des zunehmenden globalen Wohlstands und einer wachsenden Mittelschicht, insbesondere in den Schwellenländern, wird erwartet, dass Kunden vermehrt Premium-PKW-Varianten kaufen werden. Daher nimmt der Marktanteil des Basis- und des Mittelsegments von 89% auf 81% ab und das Premiumsegment wächst von 11% im Jahr 2020 auf 19% im Jahr 2030. Die dargestellte Hochlaufkurve in Abbildung 32 beinhaltet bereits den durch die COVID-19-Pandemie ausgelösten Absatzrückgang.

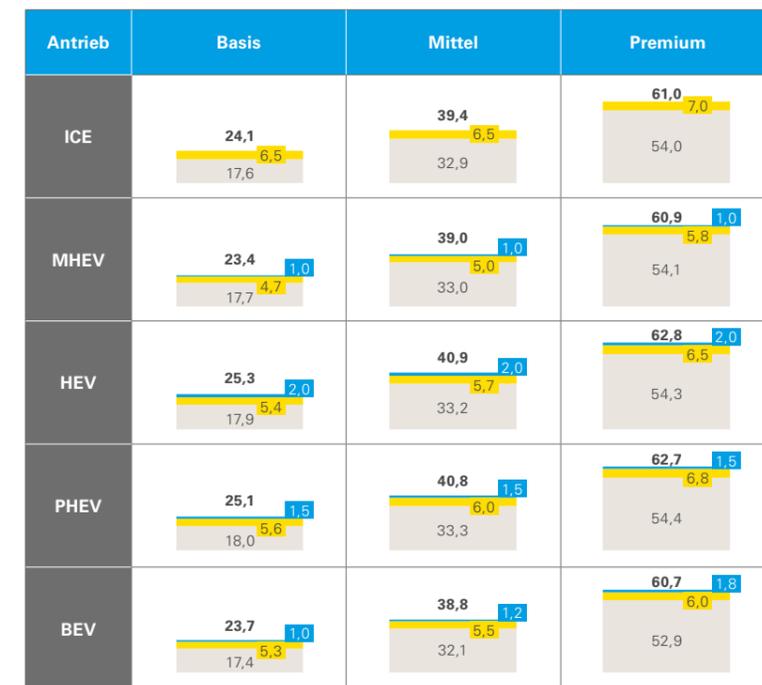
Betrachtet man die Anzahl der verbauten E-Motoren hinsichtlich der Antriebsart und der Preiskategorie des Fahrzeugs, lässt sich feststellen, dass diese vor allem bei Premiumfahrzeugen zunimmt. Premiumfahrzeuge enthalten im Durchschnitt etwa die dreifache Anzahl an kleinen Motoren im Vergleich zu Basisfahrzeugen. Für die Antriebsfunktionen werden vergleichsweise wenige Motoren benötigt. Diese sind zwar deutlich größer und leistungsstärker, jedoch hat die Antriebsart lediglich einen geringen Einfluss auf die Anzahl der verbauten E-Motoren. Alle aktuellen HEV und einige PHEV enthalten zwei Traktionsmotoren, da sie einen E-Motor für den Antrieb und einen weiteren E-Motor für die Rekuperation plus Antrieb haben. Zum Teil werden bei BEV-Allradfahrzeugen auch zwei Traktionsmotoren verbaut. Dieses technische Konzept ist jedoch meist nur bei Premiumfahrzeugen zu finden. BEV enthalten die geringste Anzahl von E-Motoren in allen Preiskategorien, da sie keine ICE-spezifischen E-Motoren benötigen (z. B. Kraftstoffpumpe, Drosselklappe etc.). Grundsätzlich ist der Bedarf und damit das Marktpotenzial bei Premiumfahrzeugen am größten.



■ Basis
 ■ Mittel
 ■ Premium
 * CAGR

Abbildung 32: Globale Entwicklung der PKW-Neuzulassungen nach Preiskategorie (inkl. COVID-19-Effekt)

Quelle: Eigene Berechnung



■ Traktionsmotoren
 ■ Mittlere Motoren
 ■ Kleine Motoren
 (Anzahl E-Motoren)

Abbildung 33: Übersicht Anzahl verbauter E-Motoren in Abhängigkeit von Antriebsart und Preiskategorie

Quelle: Eigene Berechnung

Basierend auf den weltweiten PKW-Neuzulassungen und der entsprechenden Segmentierung nach Antriebstopologie und Preiskategorie zeigt der Markt für E-Motoren für Automobilanwendungen ein stetiges Wachstum. Mit einer CAGR (engl. Compound Annual Growth Rate) von 3% wird im Jahr 2030 eine Nachfrage von knapp 3,6 Mrd. E-Motoren erreicht. Der Automobilmarkt wird mit einer Wachstumsrate von etwa 2% bis 2030 einschließlich der berücksichtigten Auswirkungen von COVID-19 stetig wachsen. Somit lässt sich ein überdurchschnittlicher Bedarf an E-Motoren in Neufahrzeugen ableiten. Die zunehmenden Stückzahlen an E-Motoren lassen sich primär auf die steigende Marktdurchdringung von Komfortfunktionen in Neufahrzeugen zurückführen, die vor allem den Einsatz kleinerer Dreh- und Stellmotoren voraussetzen (beispielsweise elektrische Sitzverstellung).

Betrachtet man die absolute Anzahl verbauter E-Motor-Technologien, so steigt der weltweite Gesamtabsatz jährlich um durchschnittlich 3% von knapp 1,9 Mrd. Einheiten pro Jahr in 2020 auf 3,6 Mrd. E-Motoren im Jahr 2030. Gleichstrommotoren (DC) stellen konstant mit über 95% den größten Marktanteil dar. Davon sind 79% kostengünstige Bürsten-

motoren (engl. Brushed DC) und 18% bürstenlose Gleichstrommotoren (engl. Brushless DC/BLDC). In den kommenden zehn Jahren wird es jedoch zu einer teilweisen Verschiebung von Brushed-DC-Motoren zu BLDC-Motoren kommen. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, werden Komponenten, die bisher direkt von Verbrennungsmotoren über Riemen angetrieben wurden, wie die Lenkung oder Klimakompressoren, zunehmend elektrifiziert. Aus Effizienz- und Zuverlässigkeitsgründen kommen hier vor allem bürstenlose Gleichstrommotoren zu Einsatz. Traktionsmotoren wie ASM, ESM und PSM stellen hinsichtlich der absoluten Stückzahl im Vergleich zu den deutlich günstigeren und vielseitig einsetzbaren Gleichstrommotoren auch in Zukunft lediglich einen sehr geringen Anteil von etwa 4% des weltweiten Gesamtmarktes für E-Motoren dar.

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 ausgeführt, lassen sich E-Motoren in die Kategorien Kleine Motoren, Mittlere Motoren und Traktionsmotoren einordnen. Dabei fallen sämtliche E-Motoren mit einer Leistung von 0–300 W in die Kategorie Kleine Motoren, 300–5 kW fallen in die Kategorie Mittlere Motoren und 5–250 kW in die Kategorie der Traktionsmotoren. Diese

Segmentierung nach Leistungsstufen dient zur genaueren Berechnung des gesamten Marktpotenzials, das auf durchschnittlichen Kosten für die E-Motoren der jeweiligen Leistungsstufe basiert.

Betrachtet man die Aufteilung des E-Motor-Bedarfs nach diesen Kategorien, zeigt sich, dass das höchste Wachstum innerhalb der Kleinen Motoren mit einem Leistungsspektrum von 0–300 W liegt. Innerhalb dieser Kategorie gewinnen Komfortfunktionen im Fahrzeug wie beispielsweise elektrische Handbremsen, Sitzverstellung oder Kurvenlicht stetig an Bedeutung. Dieser Trend wird noch durch die zunehmende Nachfrage nach Premiumfahrzeugen und weiteren Komfortfunktionen verstärkt.

Die Kategorie Mittlere Motoren hingegen verliert stetig Marktanteile, da die Anwendungen in diesem Leistungsspektrum vor allem für konventionelle Verbrennungsmotoren und die damit zusammenhängenden Komponenten wie Kraftstoffpumpen, Starter und Generatoren eingesetzt werden. Diese werden zwar teilweise über neu elektrifizierte Funktionen wie elektrische Klimakompressoren kompen-

siert, jedoch sind viele Funktionen wie elektrische Lenkungen auch bereits Standard in ICE-Fahrzeugen.

Traktionsmotoren weisen ein relativ geringes Wachstumspotenzial von ~2% im Zeitraum bis 2030 auf. Der Anteil wächst von 0,7% auf 2,6% des gesamten E-Motoren-Marktes (siehe Abbildung 35). Dieser geringe Marktanteil, gemessen an den absoluten Absatzzahlen von E-Motoren im Fahrzeug, ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass im Normalfall pro elektrifiziertem Fahrzeug lediglich ein bis zwei Traktionsmotoren zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer hohen Leistung und Größe spiegelt sich der geringe Marktanteil von Traktionsmotoren jedoch lediglich bei den Absatzzahlen wider. Ein anderes Ergebnis zeigt sich bei Betrachtung des Marktpotenzials von E-Motoren für Anwendungen im PKW. Wie in Kapitel 3.2.2 aufgezeigt, zeigt sich, dass bis zum Jahr 2030 die elektrischen Traktionsmotoren über 50% des weltweiten E-Motor-Marktpotenzials ausmachen. Somit sind sie das am stärksten wachsende Segment mit dem höchsten Marktpotenzial.

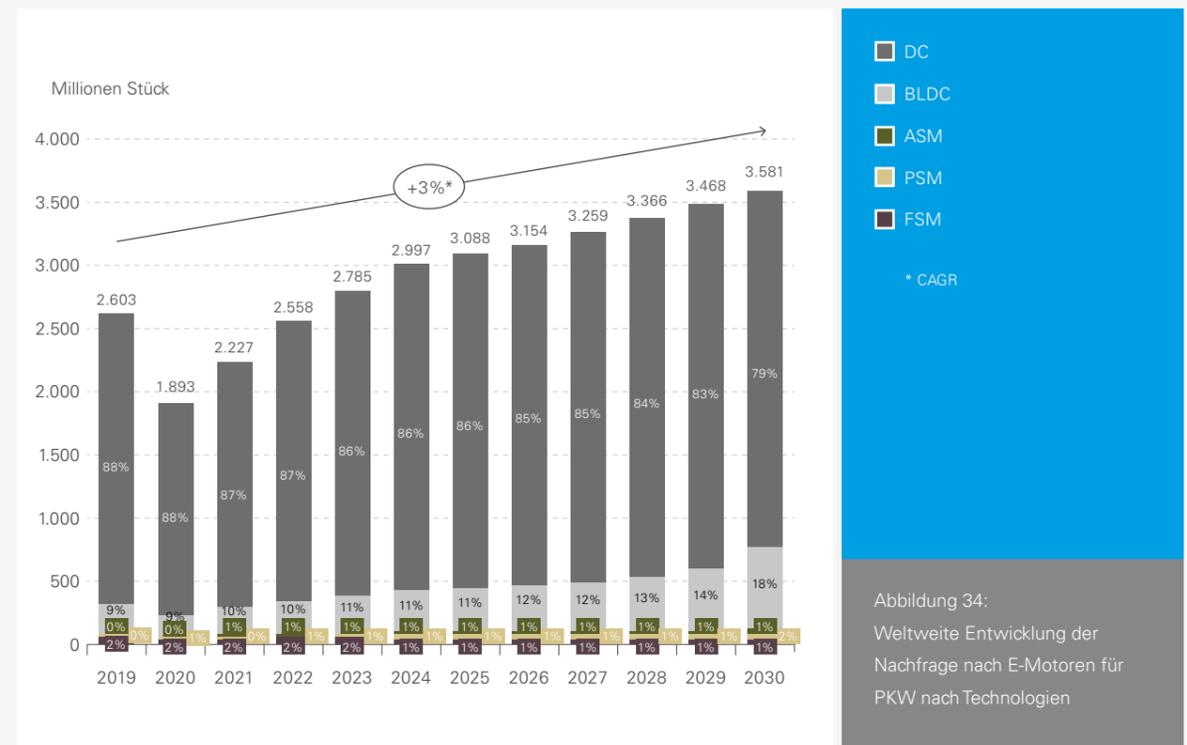


Abbildung 34: Weltweite Entwicklung der Nachfrage nach E-Motoren für PKW nach Technologien

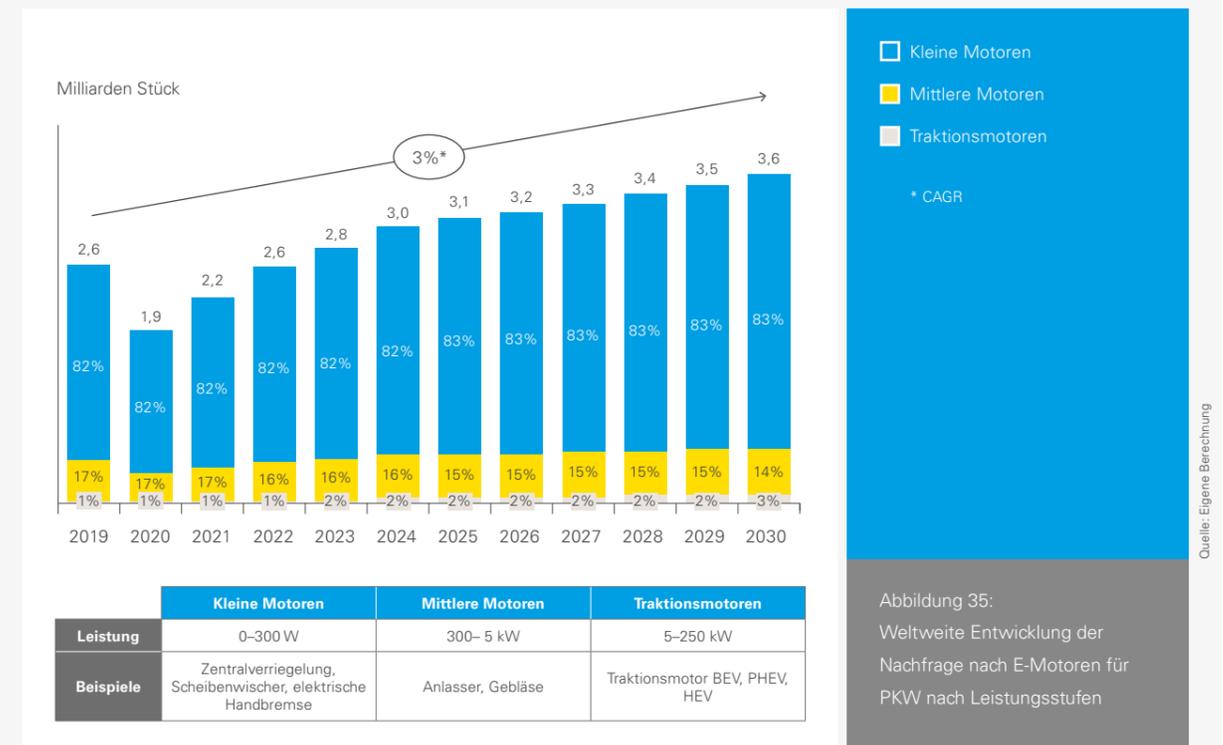


Abbildung 35: Weltweite Entwicklung der Nachfrage nach E-Motoren für PKW nach Leistungsstufen

Der weltweite Gesamtmarkt für Traktionsmotoren im Bereich PKW, einschließlich BEV und hybrider Antriebstechnologien, zeigt aufgrund der steigenden Relevanz von xEV mit 16% CAGR einen hohen jährlichen Zuwachs bis 2030. Diese Wachstumsrate beinhaltet bereits die durch die COVID-19-Pandemie hervorgerufenen Markteffekte.

Innerhalb der Traktionsmotoren, zu denen die Motortypen ASM, PSM und FSM zählen, verhalten sich die prozentualen Marktanteile über die kommenden Jahre relativ konstant. Es lässt sich lediglich eine leichte Verschiebung vom ASM zum PSM beobachten, wodurch eine Ausweitung des PSM-Marktanteils auf 60% erwartet wird. Diese Entwicklung ist auf die hohe Leistungsdichte und den entsprechend geringen Platzbedarf des PSM zurückzuführen. Der FSM-Traktionsmotor zeigt zunächst leicht steigende Marktanteile auf 8%, was auf die zunehmende Relevanz von Hybridantrieben zurückzuführen ist. Mit einem stärkeren Wechsel zu BEV-Fahrzeugen sowie einer steigenden Relevanz des PSM wird der relative Marktanteil von FSM wieder leicht zurückgehen, wie Abbildung 36 zu entnehmen ist – wobei auch im Segment der Hybridantriebe die Relevanz des PSM voraussichtlich leicht ansteigen wird.

3.2. Marktpotenziale für E-Motoren im elektrifizierten Antriebsstrang

Ausgehend von den erwarteten Bedarfen an E-Motoren für PKW werden im Folgenden konkrete Marktpotenziale innerhalb des elektrischen Antriebsstrangs abgeleitet. Hierzu werden die Hauptkostentreiber der relevanten Konzepte für Traktionsmotoren detailliert analysiert. Konkret bedeutet dies, dass für die Traktionsmotoren die Wertschöpfungsanteile hinsichtlich Material- und Produktionskosten bis 2030 ausgewiesen werden. Für die Kategorien Kleine Motoren und Mittlere Motoren werden durchschnittliche Kosten für die Kalkulation der globalen Marktpotenziale und die Einschätzung des Gesamtmarkts herangezogen.

3.2.1. Kostenbewertung der relevanten Traktionsmotortechnologien

Bei der Kostenbewertung der relevanten E-Motoren-Arten im Antriebsstrang (PSM, ASM und FSM) wird zwischen Material- und Produktionskosten unterschieden und hinsichtlich der größten Kostentreiber untersucht. Zu diesen zählen kompo-

nentenseitig Rotor, Stator und das Gehäuse. Die Materialkosten umfassen Kosten für Rohmaterialien wie Aluminium für den Gehäuseguss und Halbzeuge wie Wickeldraht, Elektrolech, Isolationsmaterialien oder Strangpressprofile für die Welle. Für die Bewertung der Produktionskosten zur Herstellung der Komponenten und der Endmontage werden die in Kapitel 2.2 beschriebenen Herstellungsprozesse zugrunde gelegt. Des Weiteren werden die Kosten für die Dimensionierung der Antriebsmotoren von BEV, HEV/PHEV und MHEV unterschieden.

Bei der im Antriebsstrang am weitesten verbreiteten Technologie, PSM, sind aufgrund der Verwendung von seltenen Erden, wie beispielsweise Neodym und Dysprosium, die Materialkosten im Rotor mit durchschnittlich 37% am höchsten. Infolge der hohen Materialkosten für den Rotor sind die anteiligen Materialkosten für Stator und Gehäuse wiederum verhältnismäßig gering (siehe Abbildung 37). Die hohen Materialkosten für den Rotor spiegeln sich ebenfalls in den absoluten Gesamtkosten wider, wodurch der PSM grundsätzlich in die teuerste untersuchte Technologie hinsichtlich der Herstellungskosten fällt. So liegen die durchschnittlichen Kos-

ten bei einem BEV mit PSM-Technologie bei etwa 700 €, wohingegen FSM und ASM bei ca. 550 € liegen.

Aufgrund der nicht notwendigen Permanentmagnete liegen die anteiligen Materialkosten im Fall des ASM für den Rotor bei lediglich 18%. Dies entspricht knapp der Hälfte der anteiligen Materialkosten des PSM. Der volumetrisch größere Bauraum des ASM führt zu einer entsprechend größeren Auslegung der Komponenten und damit zu erhöhten Materialkosten von ca. 10% für die Komponenten Stator und Gehäuse. Diese Mehrkosten werden beim Gehäuse jedoch durch den Entfall des fehlenden Resolvers teilweise kompensiert. Die Produktionskosten des Rotors sind beim ASM etwa 25% höher als bei FSM, da hier ein Gusskäfig zum Einsatz kommt, der komplexere Produktionsverfahren erfordert.

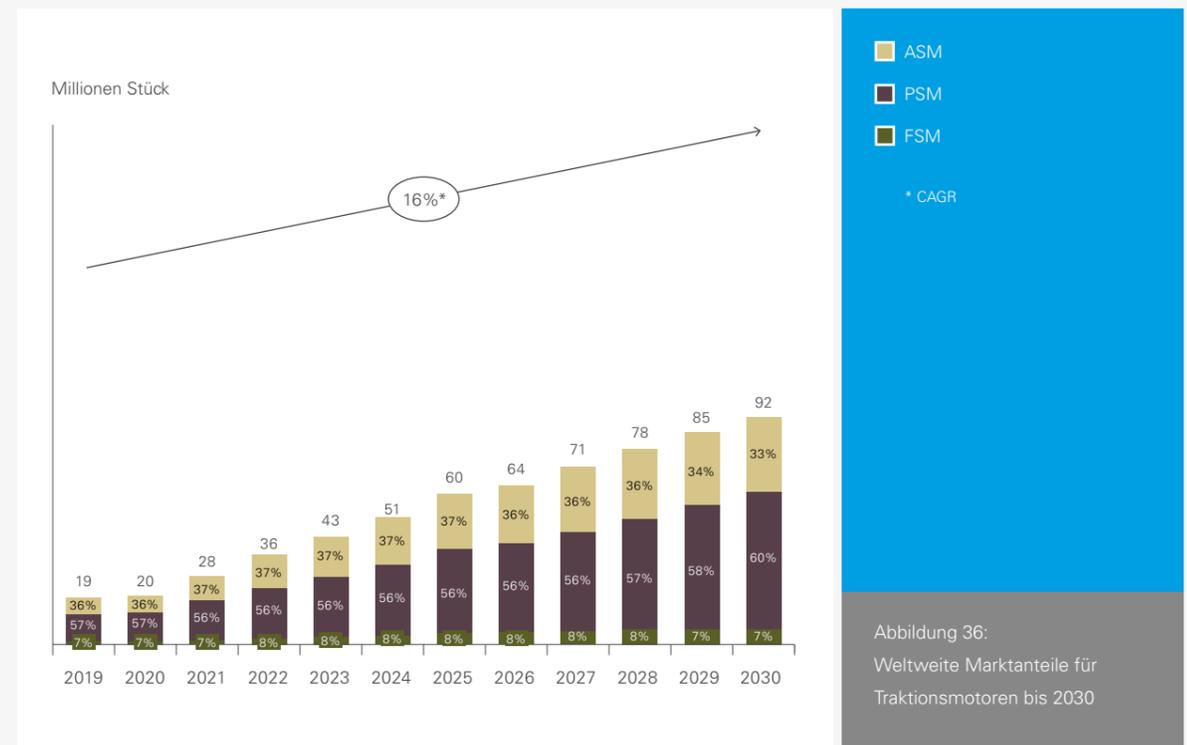


Abbildung 36: Weltweite Marktanteile für Traktionsmotoren bis 2030

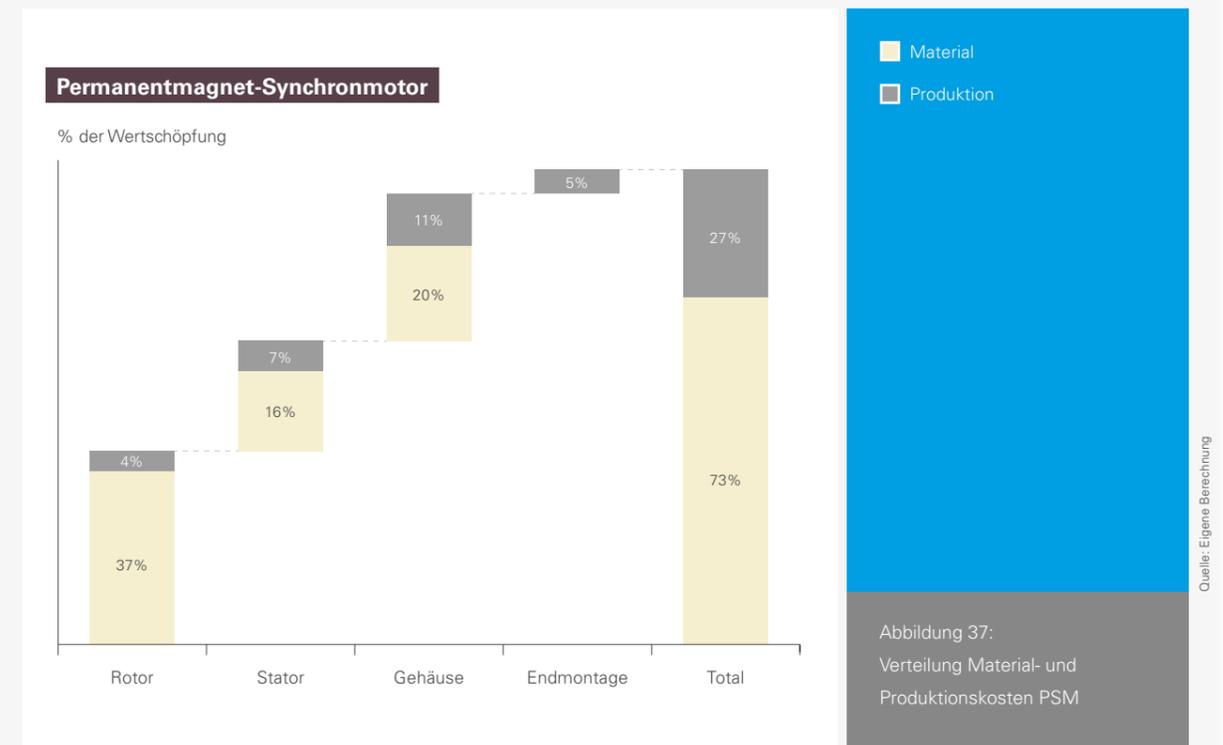
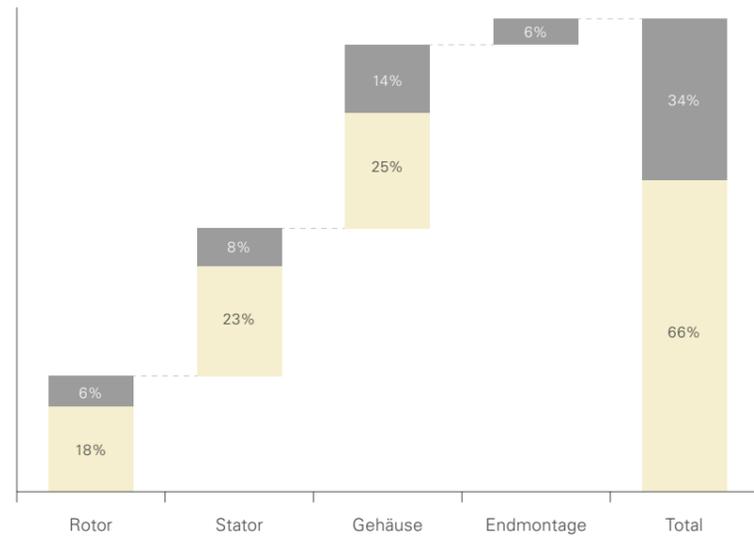


Abbildung 37: Verteilung Material- und Produktionskosten PSM

Drehstrom-Asynchronmotor

% der Wertschöpfung



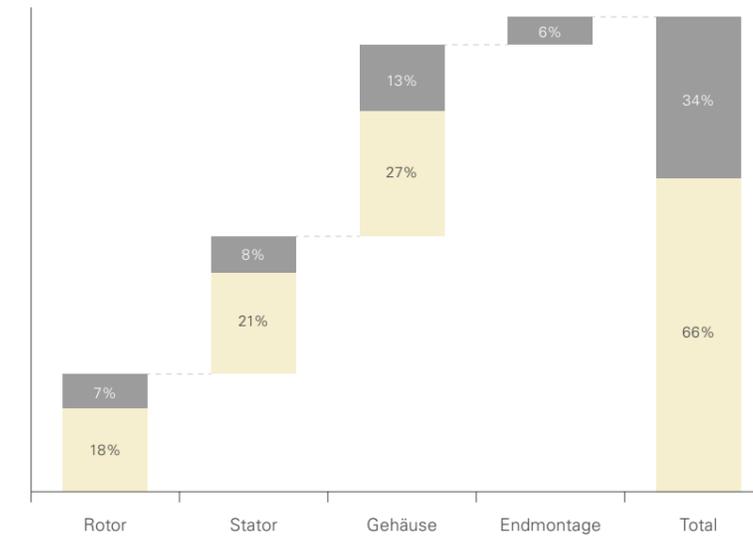
Material
Produktion

Abbildung 38:
Verteilung Material- und
Produktionskosten ASM

Quelle: Eigene Berechnung

Fremderregter Synchronmotor

% der Wertschöpfung



Material
Produktion

Abbildung 39:
Verteilung Material- und
Produktionskosten FSM

Quelle: Eigene Berechnung

In puncto Materialeinsatz sind FSM und ASM etwa gleichwertig. In beiden Technologien wird Kupfer für die Spulen verwendet. Die Produktion des Rotors ist beim FSM jedoch um etwa 35% teurer als beim PSM, da dieser durch zusätzliche Prozessschritte im Rahmen der Wicklung herstellungsseitig komplexer ist. Stator und Gehäuse sind durch die Notwendigkeit eines Schleifrings sowohl aus Material- als auch Produktionssicht um ca. 5% teurer.

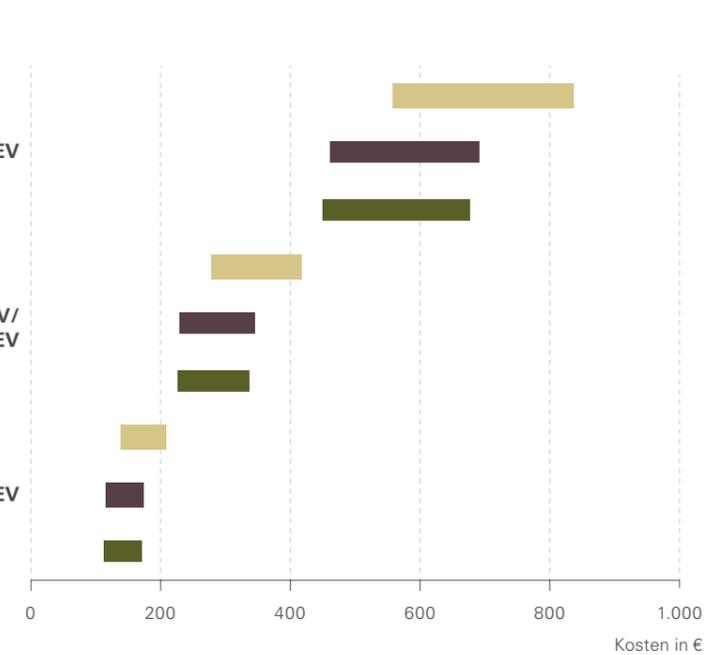
Betrachtet man die durchschnittlichen Kosten eines E-Motors, so lässt sich feststellen, dass die Technologie des ASM und des FSM aktuell meist ca. 30% günstiger ist als die des PSM. Dabei sind die verschiedenen Elektrifizierungsgrade von MHEV, HEV/PHEV und BEV und die damit zusammenhängenden Aspekte Dimensionierung und Gewicht bzw. Leistungsstufe des Traktionsmotors unabhängig von diesem Kostenvorteil. Das Kostenspektrum für MHEV in denen lediglich ein kleiner Traktionsmotor ergänzend zu einem herkömmlichen Verbrennungsmotor verbaut ist, reicht von durchschnittlich 100 € bis zu 220 € pro verbautem Motor. Motoren in Vollhybriden (HEV/PHEV) kosten in der Regel zwischen 225 € und 420 €. In rein elektrisch angetriebenen

Fahrzeugen (BEV) zwischen 450 € und 840 € (siehe Abbildung 40). Die angegebenen Kosten beziehen sich dabei auf ein industrialisiertes, hochgradig automatisiertes Produktionsverfahren im Hochvolumen und berücksichtigen die gesamten Herstellungskosten inklusive Gemeinkosten und einen Gewinnanteil entsprechend des Branchendurchschnitts. Bei niedrigeren Produktionsstückzahlen können die Kosten ggfs. nach oben abweichen. Des Weiteren werden kostenseitig keine Umlagen für die Entwicklung der Traktionsmotoren berücksichtigt.

BEV

HEV/
PHEV

MHEV



PSM
FSM
ASM

Abbildung 40:
Durchschnittliche Kosten für
Traktionsmotoren (Kosten auf
Basis Großserienproduktion
inkl. Ø Gewinnmarge)

Quelle: Eigene Berechnung

3.2.2. Globale Marktpotenziale der relevanten E-Motoren

Die globalen Marktpotenziale der oben betrachteten E-Motoren PSM, ASM und FSM basieren auf den in Abbildung 40 dargestellten Kostenbewertungen für die jeweiligen Technologien. Für die Prognose der weltweiten Marktpotenziale wurden die entsprechenden durchschnittlichen Kosten pro E-Motor-Technologie und -Leistungsklasse mit der erwarteten Anzahl von Fahrzeugneuzulassungen und der Anzahl der verbauten Traktionsmotoren pro Fahrzeug multipliziert. Eine Verteilung der Marktpotenziale auf die entsprechenden Komponenten und Produktionsanteile wurde basierend auf den in Abbildung 15 dargestellten Herstellungsprozessen errechnet. Im Rahmen dieser Betrachtung wurde auch eine Kostenreduktion durch Skaleneffekte in der Großserie sowie durch die steigenden Produktionskapazitäten mit 1,5% pro Jahr für die verschiedenen Technologien einheitlich berücksichtigt. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, wurden die Technologietrends und -sprünge mit 1% durchschnittlichem Reduktionspotenzial pro Jahr integriert. Diese Berechnung beruht auf einer Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Wertschöpfungsänderung.

Das weltweite Verkaufsvolumen von Traktionsmotoren ergibt auf Basis der Analyse im Jahr 2019 insgesamt ein Marktpotenzial von 4,88 Mrd. €. Bis zum Jahr 2030 wird sich dieses mit einem jährlichen Volumen von 22,02 Mrd. € mehr als vervierfachen. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) liegt somit bei 15%.

Gemessen am Marktpotenzial ist der PSM mit einem Marktanteil von 66% im Jahr 2020 führend und wird bis 2030 mit einem Anteil von 74% am Gesamtmarktpotenzial weiter an Bedeutung gewinnen. Dies liegt neben den steigenden Verkaufszahlen auch an den höheren Herstellungskosten des PSM. Der FSM und insbesondere der ASM werden entsprechend an Marktanteilen verlieren. Der FSM-Traktionsmotor weist einen relativ konstant geringen Marktanteil zwischen 5% und 6% auf. Aufgrund der höheren volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte des PSM und der dadurch generierten Einsparungen bei Bauraum und Gewicht im Fahrzeug wird der ASM ab 2025 sukzessive verdrängt.

Unter Einbezug aller E-Motoren-Kategorien im PKW, auch derer außerhalb des Antriebsstrangs, liegt das prognostizierte weltweite Marktpotenzial aller E-Motoren im Jahr 2020 bei insgesamt 17,61 Mrd. €. Im Jahr 2030 wird es auf ca. 44 Mrd. € ansteigen und sich somit um den Faktor 2,5 vervielfachen. Die Gesamtwachstumsrate liegt bei 6%. Die Entwicklung des weltweiten Marktpotenzials zeigt ein Wachstum insbesondere in der Kategorie Traktionsmotoren. Dies ist vor allem auf die hohen Kosten für Traktionsmotoren gegenüber kleineren Leistungsstufen zurückzuführen, die jedoch in deutlich höheren Stückzahlen verkauft werden. Die Kategorien Kleine Motoren und Mittlere Motoren verlieren aufgrund der steigenden Absatzzahl von Traktionsmotoren zunehmend Marktanteile.

durch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Des Weiteren sind die E-Motoren-Arten, die in den Kategorien Kleine Motoren und Mittlere Motoren zum Einsatz kommen, bereits am Markt etabliert und werden im Rahmen von Commodity-Strukturen zugekauft. Dabei sind Produktionsstückzahlen von über 1,5 Mio. p.a. auf einer Fertigungslinie sowie ein Bezug aus „Best Cost Countries“ bereits Standard.

Betrachtet man das absolute Marktpotenzial, so wächst jedes Segment in der beobachteten Zeitachse ab 2020. Für die weitere Betrachtung wird der Fokus auf das am stärksten wachsende Segment, die Traktionsmotoren, gelegt. Die hier aufgeführten weiteren E-Motoren-Segmente dienen als Basis für die Einschätzung des gesamten E-Motoren-Marktes in der PKW-Produktion. Sie verdeutlichen die Änderung

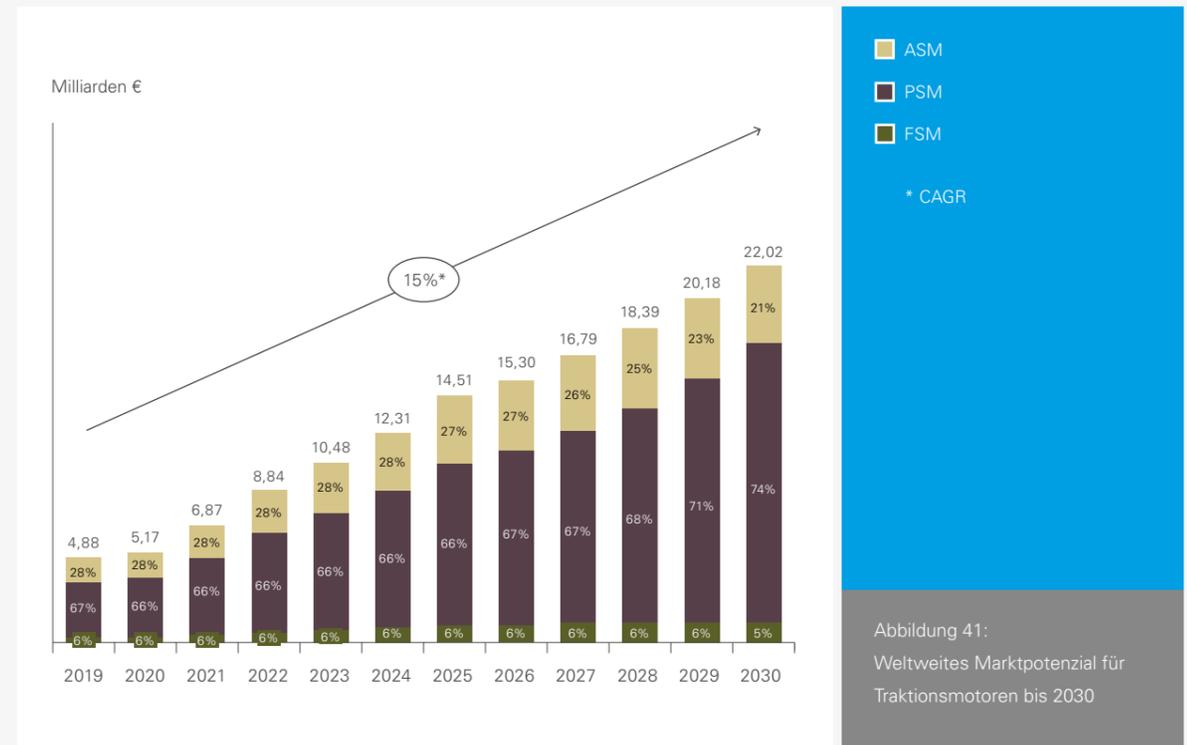


Abbildung 41:
Weltweites Marktpotenzial für
Traktionsmotoren bis 2030

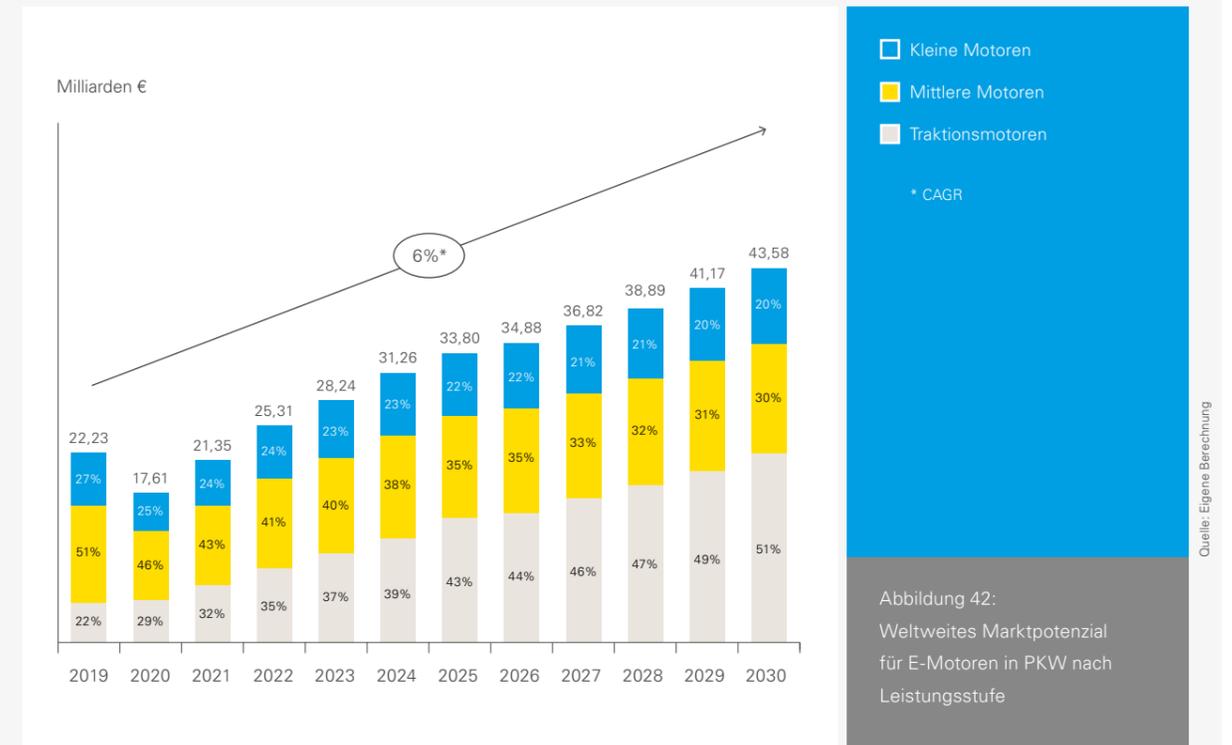


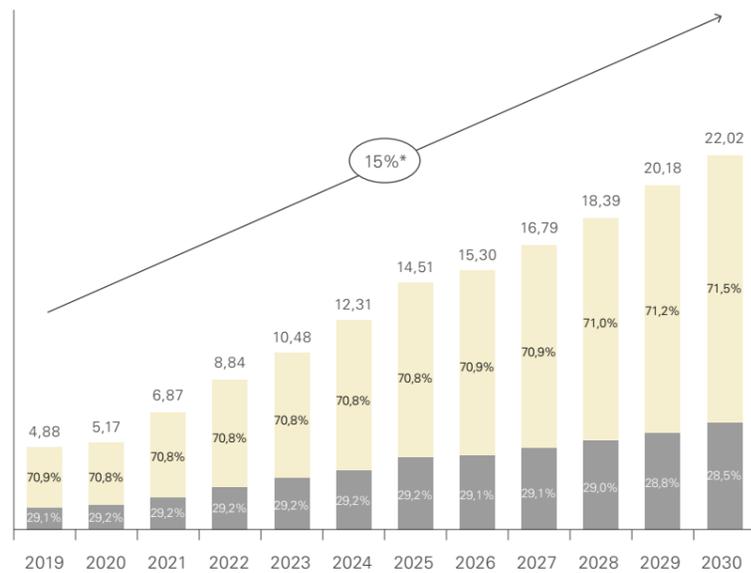
Abbildung 42:
Weltweites Marktpotenzial
für E-Motoren in PKW nach
Leistungsstufe

3.2.3. Wertschöpfungsanteile im Rahmen der globalen Marktpotenziale

Die Betrachtung des weltweiten Marktpotenzials der Traktionsmotoren nach Material- und Produktionskosten zeigt, dass die Aufteilung bis 2030 auf einem relativ konstanten Niveau bleiben wird. So entfallen durchschnittlich 71% der Gesamtkosten auf Material und 29% auf die Produktion. Der leichte Anstieg der Materialkosten gegenüber den Produktionskosten wird auf die höhere Relevanz des PSM zurückgeführt. Diese höheren Materialkosten entstehen hauptsächlich aufgrund der verwendeten Permanentmagnete. **Das globale Marktpotenzial für Traktionsmotoren mit Anwendung im PKW steigt von aktuell 5,17 Mrd. € im Jahr 2020 auf ca. 22 Mrd. € im Jahr 2030.**

Bei einer genaueren Betrachtung der einzelnen Schritte innerhalb des Produktionsprozesses von Traktionsmotoren (PSM, ASM und FSM) lässt sich feststellen, dass die Materialkosten mit durchschnittlich 30% der Hauptkostentreiber für die Herstellung des Rotors sind. Da der Rotor sich hinsichtlich der Technologien für Traktionsmotoren unterscheidet, wird die Kalkulation des Marktpotenzials über die jeweilige Motorenart und das Leistungsniveau vorgenommen. Beim PSM belaufen sich die Materialkosten des Rotors auf ca. 37%, wohingegen beim ASM und FSM diese lediglich bei ca. 18% liegen. Gehäuse und Stator sind für alle Technologien identisch und verursachen ca. 22% bzw. 19% der Gesamtkosten (siehe Abbildung 44). Durch eine Verschiebung der Marktanteile zum PSM steigt die anteilige Wertschöpfung bei den Materialkosten des Rotors bis 2030 auf 32%.

Millionen Stück



Materialkosten
Produktionskosten
* CAGR

Abbildung 43: Wertschöpfungsverteilung des weltweiten Marktpotenzials für Traktionsmotoren bis 2030

Quelle: Eigene Berechnung

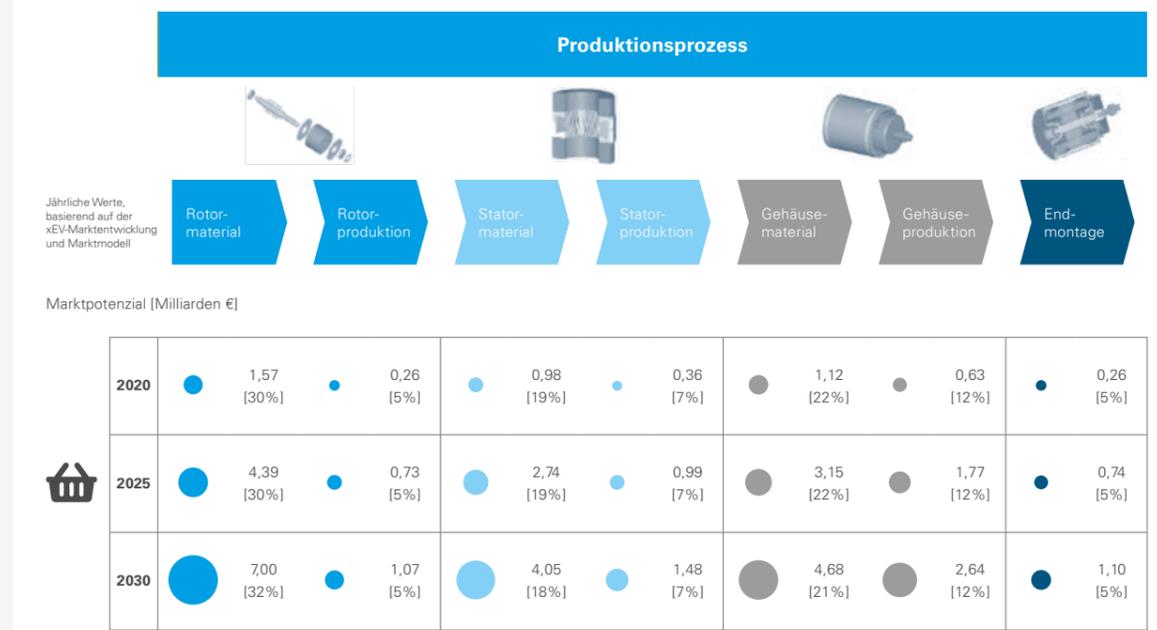


Abbildung 44: Marktpotenziale entlang der Wertschöpfungskette für Traktionsmotoren bis 2030

Quelle: Eigene Darstellung

Die Marktpotenziale für den Gesamtmarkt liegen vor allem bei den Materialien und Halbzeugen, die zur Herstellung benötigt werden. So beläuft sich das prognostizierte weltweite Marktpotenzial für Materialien im Jahr 2030 auf 7,00 Mrd. € für den Rotor, 4,68 Mrd. € für das Gehäuse und 4,05 Mrd. € für den Stator. Aus Sicht der Produktion entfallen 2,64 Mrd. € der weltweiten Wertschöpfung auf die Herstellung des Gehäuses, 1,48 Mrd. € auf den Stator und 1,07 Mrd. € auf die Produktion des Rotors. Globale Wertströme entlang der Produktion von elektrischen Traktionsmotoren zeigen, dass höchste Werte innerhalb des Materials erreicht werden können.

Die Berechnung der weltweiten **Marktpotenziale für elektrische Traktionsmotoren** erfolgt auf Basis der in diesem Themenpapier **prognostizierten Fahrzeugzulassungen für xEV**, der **durchschnittlichen Anzahl von verbauten Traktionsmotoren pro Fahrzeug** sowie der durchschnittlichen Kosten für Traktionsmotoren nach Fahrzeugtopologie (MHEV/HEV/PHEV/BEV) und der eingesetzten Motorbauart (PSM/ASM/FSM). Daraus ergibt sich ein prognostiziertes **weltweites Marktpotenzial von ca. 5,17 Mrd. € im Jahr 2020, das bis zum Jahr 2030 auf 22,02 Mrd. €** anwachsen wird. Eine detaillierte Betrachtung des Marktpotenzials hinsichtlich des Materialeinsatzes und der Produktionskosten ergibt einen **Materialkostenanteil von über 70%**, die **Produktion** der Traktionsmotoren hingegen beläuft sich auf **ca. 30% des Wertanteils**. Da bei einer Produktion in Baden-Württemberg Materialien und Halbzeuge weitestgehend international zugekauft werden, wird nachfolgend der Wertanteil durch die Produktion von Traktionsmotoren als Wertschöpfungspotenzial für das Land bezeichnet.

4.

Wertschöpfungspotenziale elektrischer Antriebsmotoren im automobilen Sektor in Baden-Württemberg

Der globale Markt für E-Motoren befindet sich aktuell im Aufbau. Sowohl verschiedene OEMs als auch Automobilzulieferer investieren in die Forschung und Entwicklung sowie in die Produktion von E-Motoren. Baden-Württemberg besitzt dank eines breiten und eng verknüpften Netzwerks an Maschinenbauern, Anlagenherstellern, Forschungsinstituten, Automobilunternehmen und Fahrzeugzulieferern hohes Potenzial, an der europäischen Wertschöpfung der E-Motorenproduktion beteiligt zu sein. Hierzu bedarf es jedoch einer frühen und zukunftsorientierten Ausrichtung des Industriestandorts auf die mit der E-Motoren-Produktion verbundenen Chancen und Herausforderungen durch Politik, Wissenschaft und Wirtschaft.

Für die Herleitung des Wertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs bei der Produktion von E-Motoren wird zunächst die Herstellerlandschaft des Landes unter Begutachtung aller Produktionsschritte untersucht. Anschließend werden die Strategien sowie bereits aufgebaute Kompetenzen ansässiger OEMs und Tier-1- bis -n-Zulieferer für die Fertigung von E-Motoren analysiert. Auf Basis dieser Analysen und des in Kapitel 3 prognostizierten Anstiegs sowohl des europäischen als auch des weltweiten Marktpotenzials für elektrische Traktionsmotoren wird nachfolgend ein Best-Case-Szenario berechnet. Abschließend werden in der Produktion von E-Motoren entstehende Beschäftigungspotenziale für Baden-Württemberg bewertet.

- Baden-Württemberg verfügt über ein breites und gut verknüpftes Automobilindustrie-Netzwerk und damit über gute Voraussetzungen, an den steigenden Marktpotenzialen in der Produktion und Entwicklung von E-Motoren zu partizipieren. Über **60 Unternehmen**, die Kompetenzen zur Produktion von E-Motoren sowie deren Subkomponenten besitzen, konnten identifiziert werden. Darunter befinden sich sowohl OEMs als auch Zulieferer.

- Grundsätzlich sind **alle Kompetenzen, die für die Herstellung von E-Motoren von Bedeutung sind, im Land verfügbar**. Der Schwerpunkt liegt allerdings auf der Montagekompetenz, wohingegen die Fertigung von (Sub-)Komponenten im direkten Vergleich eine eher untergeordnete Rolle einnimmt.

- In einem **Best-Case-Szenario**, das von einer vollständigen Fertigung der E-Motoren inklusive der (Sub-)Komponenten ohne Materialien und Halbzeuge im Land ausgeht, wird das **Wertschöpfungspotenzial in Baden-Württemberg** auf 25 Mio. € im Jahr 2020 und auf 113 Mio. € im Jahr 2030 beziffert. Dem Best-Case-Szenario zugrunde liegt ein von den Autoren des Themenpapiers angenommener Wertschöpfungsanteil Baden-Württembergs an der E-Motoren-Produktion von 8% am europäischen und ca. 2% am globalen Wertschöpfungspotenzial. Die Ableitung erfolgte auf Basis der Strukturstudie BW^a mobil 2019. Im Rahmen der Strukturstudie wurde für das Basisjahr 2019 ein Anteil Baden-Württembergs

von 3–5% an der europaweiten Wertschöpfung im Bereich „neuer Komponenten“ abgeleitet und aufgrund verschiedener Annahmen im vorliegenden Themenpapier nach oben korrigiert (siehe Kapitel 4.2).

- Aktuell wird in Baden-Württemberg die Wertschöpfung hauptsächlich durch Tier-1-Unternehmen entlang der Entwicklung, Erprobung und Fertigung der Komponenten sowie der Endmontage von E-Motoren erwirtschaftet.

- Eine Analyse der Strategien von OEMs und Automobilzulieferern zeigt, dass bis zum Jahr 2030 eine teilweise **vertikale Integration der E-Motoren-Fertigung seitens der OEMs** stattfinden soll. Infolge dieses Trends beteiligen sich die Fahrzeughersteller stärker an der Wertschöpfung bei der E-Motoren-Produktion und kompensieren den Rückgang bei der Produktion von Verbrennungsmotoren.

- Aufgrund des steigenden Bedarfs an E-Motoren wird erwartet, dass es **zu steigenden Beschäftigungszahlen in der Produktion** kommen wird. In diesem Zusammenhang wurden Fade-in-Beschäftigungseffekte kalkuliert – daraus wurde ein Bedarf an ca. 2.000 Mitarbeitenden für das Jahr 2030 im Best-Case-Szenario abgeleitet.

4.1. Herstellerlandschaft von Antriebsmotoren und (Sub-)Komponenten in Baden-Württemberg

Für eine Analyse der Potenziale entlang der Wertschöpfungskette elektrischer Antriebsmotoren wurde zunächst die Herstellerlandschaft der elektrischen Antriebsmotoren und Subkomponenten in Baden-Württemberg analysiert (siehe Abbildung 45). Die Untersuchung ergab 288 Unternehmen, bestehend aus OEMs und Zulieferern, die grundsätzlich über die Technologien zur Produktion von elektrischen Traktionsmotoren verfügen. Im Rahmen der Analyse wurden alle Produktionsschritte zur Fertigung von Rotor, Stator und Gehäusekomponenten sowie die notwendigen Kompetenzen für die Assemblierung berücksichtigt und bewertet. Des Weiteren wurden Unternehmen in Betracht gezogen, die über die erforderlichen Fähigkeiten zur Fertigung oder Bearbeitung von Subkomponenten wie Blechpaket, Welle oder Gehäuse verfügen. Die Datenbasis der Analyse stützt sich auf eine Recherche in verschiedenen Informationsnetzwerken wie den Mitgliedsunternehmen der von e-mobil BW koordinierten Cluster-Initiativen, Industrienetzwerken und Onlineresourcen wie Kompass, IndustryStock und Northdata.

Ausgehend von den 288 identifizierten Unternehmen besitzen 281 dieser Unternehmen eine oder mehrere Fertigungsstätten in Baden-Württemberg, die für die Produktion von elektrischen Traktionsmotoren oder deren Komponenten geeignet sind. Diese Unternehmen wurden anschließend hinsichtlich ihrer Fähigkeiten zur Abdeckung integrierter Wertschöpfungsschritte bewertet. Beispiele hierfür sind Prozessschritte wie Stanzen und Paketieren bei der Herstellung von Blechpaketen oder spanende Bearbeitung, Härten und spanende Nachbearbeitung bei der Produktion der Welle.

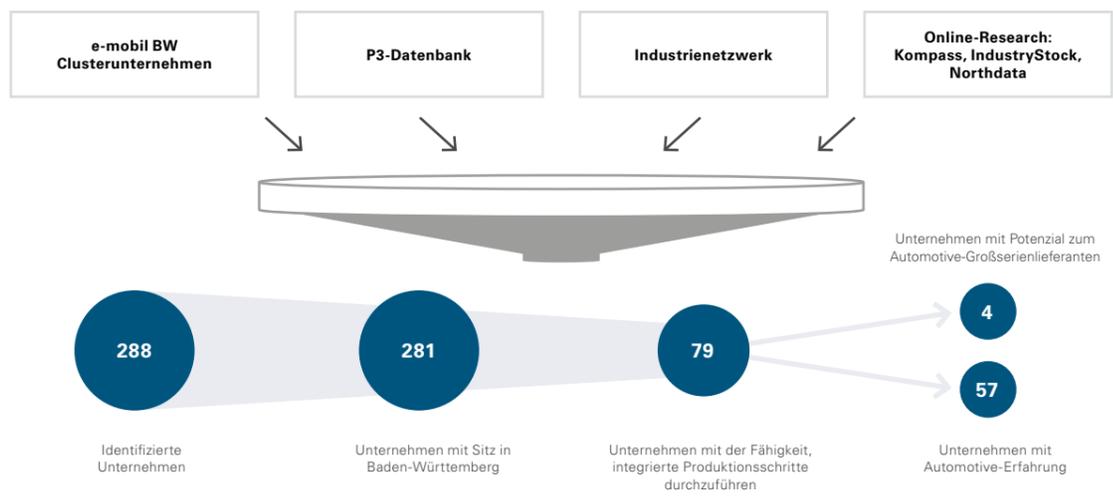


Abbildung 45: Untersuchung von Unternehmen mit Kompetenzen zur E-Motoren-Fertigung

Quelle: Eigene Darstellung

Die integrierten Wertschöpfungsstufen wurden dabei auf Basis des in Kapitel 2.2 dargestellten Produktionsprozesses für E-Motoren abgeleitet (siehe Abbildung 46) und stellen die in der heutigen Traktionsmotorenproduktion übliche Wertschöpfungstiefe dar (Kampker, 2014). Die Analyse kommt zum Ergebnis, dass 79 der 281 Unternehmen einzelne oder mehrere Schritte der integrierten Wertschöpfung durch bereits verfügbare Kompetenzen abdecken können.

Auf Grundlage der in Abbildung 46 dargestellten integrierten Wertschöpfungsstufen wurde eine Detailanalyse der identifizierten Unternehmen durchgeführt.

Dabei wurden die Lieferanten nach ihrer Kompetenz bei der Fertigung sowohl der Komponenten wie Rotor, Stator und Gehäuse als auch der Subkomponenten untersucht. Hierbei wurde die Gewichtung der Wertschöpfungspotenziale der einzelnen Subkomponenten für die Beurteilung des Gesamtwertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs berücksichtigt. Für die Fertigung des Rotors ergibt sich eine Clusterung der Wertschöpfung von 9% für das Blechpaket, von 68% für die Welle und von 23% für die Montage. In Abbildung 46 ist dies am Beispiel eines PSM dargestellt.

Rotor				
Wertschöpfungsteil	9 %	68 %	23 %	100 %
Fertigungsschritt	Blechpaket	Welle	Montage Rotor	Total
Stator				
Wertschöpfungsteil	17 %	83 %		100 %
Fertigungsschritt	Blechpaket	Wickeln, Isolieren und Montage Stator		Total
Gehäuse				
Wertschöpfungsteil	69 %	31 %		100 %
Fertigungsschritt	Formgebung	Bearbeiten, Reinigen und Auswuchten		Total

Endmontage		
Wertschöpfungsteil	100 %	100 %
Fertigungsschritt	Zusammenbau, Gesamtsystem	Total

Abbildung 46: Wertschöpfungssplit der Komponentenproduktion am Beispiel PSM

Quelle: Eigene Darstellung

Montage Traktionsmotor und Subkomponenten

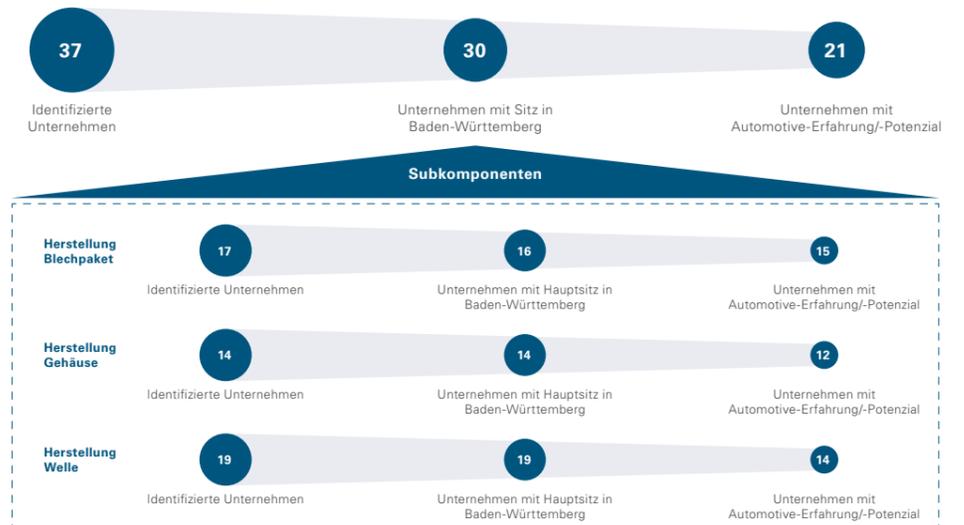


Abbildung 47: Detailanalyse potenzieller E-Motoren- und Komponentenhersteller

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 47 zeigt die Analyse potenzieller E-Motoren- und Komponentenhersteller. Diese unterteilen sich in vier integrierte Wertschöpfungsschritte, basierend auf Abbildung 46:

- Montage von Traktionsmotoren inklusive der Montage von Rotor und Stator
- Herstellung des Blechpakets für Stator und Rotor
- Herstellung des Gehäuses
- Herstellung der Welle

Dabei konnte festgestellt werden, dass 37 der Lieferanten grundsätzlich zur Montage von Traktionsmotoren und deren Komponenten fähig sind. Von diesen 37 Unternehmen haben 30 dedizierte Produktionsstätten für E-Motoren in Baden-Württemberg. Im letzten Schritt der Analyse wurden die 30 Unternehmen hinsichtlich ihrer Qualifizierung als Lieferanten für die Automobilindustrie untersucht. 21 Unternehmen haben bereits Erfahrung als Automobilzulieferer bzw. haben die Möglichkeit, sich kurzfristig innerhalb weniger Monate als Automobilzulieferer zu qualifizieren. Für die Subkomponentenfertigung wurden die Unternehmen mittels der gleichen Methodik untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass für die Herstellung des Blechpakets 15 von 17 Unternehmen als Lieferanten in der Automobilindustrie in Frage kommen. Bei der Herstellung des Gehäuses sind es 12

von 14 und bei der Herstellung der Welle 14 von 19 Unternehmen. Die detaillierte Aufschlüsselung der im Raum Baden-Württemberg ansässigen Unternehmen mit entsprechendem Fertigungsstandort für Montage, Blechpaket, Gehäuse und Welle wurde rein auf die Fertigungskompetenzen bezogen und bewertet. Dies bedeutet, dass Unternehmen mit entsprechend breit aufgestelltem Kompetenzportfolio durch Mehrfachnennungen in den einzelnen Wertschöpfungsstufen vertreten sein können. Aus diesem Grunde übersteigt die Addition der identifizierten Unternehmen der Komponentencluster die Anzahl der in Abbildung 47 identifizierten Unternehmen.

Keine Berücksichtigung in der Untersuchung fanden Unternehmen, die ausschließlich Kompetenzen zur Fertigung kleiner und mittlerer Motoren mit Leistungen kleiner 5 kW sowie großer E-Motoren mit Leistungen größer 1.000 kW besitzen. Als Ergebnis der Analyse konnten insgesamt 61 Unternehmen identifiziert werden, bei denen die Grundvoraussetzungen für die Qualifizierung als Automotive-Großserienlieferant vorhanden sind. 57 der Unternehmen haben bereits Erfahrungen als Automotive-Serienlieferanten und vier können sich durch ihre bereits vorhandene Infrastruktur und Zertifizierung kurzfristig zu Lieferanten für die Automobilindustrie qualifizieren.

Die im Rahmen dieser Analyse evaluierten Lieferanten stellen jedoch nicht die Gesamtheit der Lieferanten für elektrische Traktionsmotoren in Baden-Württemberg dar. So werden keine Lieferanten für Kleinserien und Prototypen untersucht. Auch sind Unternehmen, die Maschinen für die Produktion von Traktionsmotoren und deren Komponenten herstellen, nicht im Betrachtungsumfang enthalten. Eine Wertschöpfung durch diese Unternehmen stellt somit zusätzliches Potenzial für das Land Baden-Württemberg dar.

Mit dem Ziel, weitere Einblicke in die Herstellerlandschaft von Antriebsmotoren und Subkomponenten in Baden-Württemberg zu erhalten, werden im Folgenden die aktuellen Strukturen und Strategien von OEMs, Tier-1- und Tier-2-Zulieferern sowie deren Sublieferanten aufgezeigt.

4.1.1. OEMs und Tier-1-Unternehmen in Baden-Württemberg

Baden-Württemberg gilt als eine der weltweit führenden Regionen der Automobilindustrie. Das Land besitzt ein besonders ausgeprägtes regionales Branchencluster, das die gesamte automobilen Wertschöpfungskette inklusive zugehöriger Dienstleistungen und innovativer Entwicklungszentren abdeckt. Die regionale Nähe bietet den Clusterunternehmen entscheidende Wettbewerbsvorteile, da Synergien durch lokale Kooperationen genutzt werden können. Die Herstellerlandschaft von Antriebsmotoren in Baden-Württemberg wird insbesondere durch die ansässigen Fahrzeughersteller wie die Daimler AG, die Audi AG und die Dr. Ing. h.c.F. Porsche AG sowie verschiedene global agierende Tier-1-Unternehmen wie die Robert Bosch GmbH, die ZF Friedrichshafen AG, die Schaeffler AG oder die Mahle GmbH geprägt. Dieser Wertschöpfungskern trägt mit über 300.000 Mitarbeitenden, wovon ca. 120.000 Personen bei den OEMs beschäftigt sind, in großem Maße zu Wirtschaftsleistung Baden-Württembergs bei. Die Elektrifizierung der Mobilität beeinflusst die Beschäftigung im Wertschöpfungskern zukünftig stark (e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, 2019).

Um die Entwicklungen der Kernunternehmen im Bereich der E-Motoren-Fertigung besser zu verstehen, wird zunächst ein Überblick über die angekündigten Strategien gegeben. Hierbei sollen insbesondere die angekündigten Unternehmensausrichtungen sowie der Aufbau von Entwicklungszentren und Fertigungslinien herausgestellt werden. Ab-

schließend werden die daraus resultierenden Chancen und Risiken für das Land diskutiert.

Mit Blick auf die Fahrzeughersteller Daimler AG und Dr. Ing. h.c.F. Porsche AG lassen sich einheitliche Trends feststellen. Zum aktuellen Zeitpunkt werden die elektrischen Traktionsmotoren zu großen Anteilen von Tier-1-Unternehmen zugekauft. Den Tier-1-Lieferanten fallen somit große Teile der Wertschöpfung zu. Zukünftig ist es geplant, die Forschung und Entwicklung im Bereich des elektrischen Antriebsstrangs wie auch die Fertigung verstärkt inhouse, also innerhalb der Unternehmensgruppe der Fahrzeughersteller, durchzuführen. Die Dr. Ing. h.c.F. Porsche AG hat diesbezüglich ihr Entwicklungszentrum in Weissach ausgebaut. Die Daimler AG hat das Technologieprogramm „Vision EQXX“ initiiert, nachdem zuvor der E-Motorenhersteller EM-Motive, welcher 2011 als Joint Venture zwischen der Daimler AG und der Robert Bosch GmbH gegründet wurde, vollständig an die Robert Bosch GmbH verkauft wurde. Ziel des Technologieprogramms ist es, die Effizienz des E-Motors zu steigern und dadurch höhere Reichweiten bei xEV erzielen zu können.

Porsche hat zudem begonnen, die Assemblierung des E-Motors für das Modell Taycan in Zuffenhausen durchzuführen. Der E-Motor des Hybrid-Modells Panamera E wird hingegen weiterhin vollständig von der ZF Friedrichshafen AG zugekauft (Rudschies, 2019). Die Daimler AG kauft aktuell den kompletten elektrischen Antriebsstrang für das Modell EQC von der ZF Friedrichshafen AG. Es wurde jedoch angekündigt, zukünftig den elektrischen Antriebsstrang samt E-Motor, Leistungselektronik und Getriebeteilen in Untertürkheim zu fertigen. Audi übernimmt bereits Teile der Fertigung von E-Motoren in seinem Werk in Győr, Ungarn (Schaal, 2019). Für den Standort zur Fahrzeugproduktion in Neckarsulm wurden bisher keine Ankündigungen bzgl. der Produktion des E-Antriebsstrangs veröffentlicht.

Es zeigt sich, dass es in Baden-Württemberg zu einer partiellen Kompetenzverschiebung im Bereich der Traktionsmotorenfertigung kommen wird.

Die Tier-1-Unternehmen haben weiterhin das Ziel, stark an der Fertigung von E-Motoren beteiligt zu bleiben. Dies lässt sich auch an den angekündigten Unternehmensstrategien der größten Automobilzulieferer Baden-Württembergs erkennen. Die ZF Friedrichshafen AG, die Robert Bosch GmbH oder die Schaeffler AG haben ihre Kompetenzen im Bereich

E-Motoren weiter ausgebaut und Zentren für Forschung und Entwicklung gegründet. Die Fertigung des kompletten E-Motors samt Rotor, Stator und Gehäuse soll zukünftig auch inhouse durchgeführt werden. Dabei wird angestrebt ein breites Portfolio an Motoren für alle Anwendungsklassen, MHEV, HEV, PHEV und BEV, anbieten zu können und weiter im Bereich E-Motoren zu expandieren. Die Schaeffler AG hat dazu beispielsweise den Hersteller für Statoren Elmotec-Statomat übernommen und die ZF Friedrichshafen AG ist ein Joint Venture mit dem chinesischen E-Motoren-Hersteller Wolong-Electric eingegangen.

Insbesondere die vertikale Integration der Fahrzeughersteller bringt die Chance mit sich, größere Teile der globalen Wertschöpfung von E-Motoren nach Baden-Württemberg zu ziehen. Für den auf einem Verbrennungsmotor basierten Antriebsstrang konnte am europäischen Markt im Rahmen der Strukturstudie BW^e mobil 2019 (e-mobil BW GmbH, 2019) aufgezeigt werden, dass die Tier-1-Lieferanten tendenziell stärker auf Best Cost Sourcing setzen als die Fahrzeughersteller. **Im Rahmen einer Großserienproduktion des E-Motors, vergleichbar mit dem heutigen Produktionsvolumen des Verbrennungsmotors, wird daher eine ähnliche Tendenz erwartet.** Diese wird aufgrund der Abbaugelände von seltenen Erden für die Magnete des PSM noch verstärkt. Heute kann, wie in Kapitel 5 aufgezeigt, der Anteil an außerhalb von Baden-Württemberg bezogenen (Sub-)Komponenten als noch höher bewertet werden.

Die angekündigte vertikale Integration der E-Motoren-Herstellung wird vor allem durch zwei Faktoren bestimmt.

1. Nutzung freierwerdender Kapazitäten:

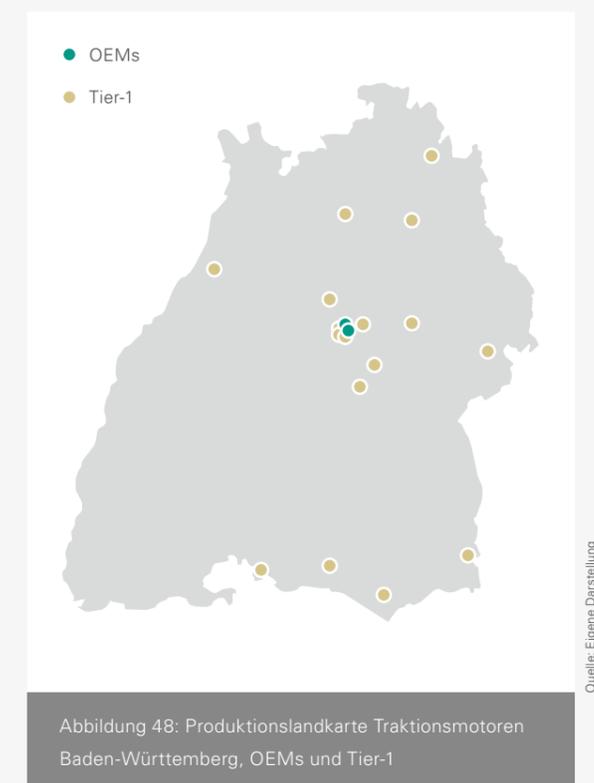
OEMs können freierwerdende Kapazitäten durch die sinkende Relevanz der Verbrennungsmotorproduktion für die Produktion von E-Motoren nutzen.

2. E-Motor als Differenzierungsmerkmal:

Je nachdem, wie stark der E-Motor als Differenzierungskomponente eines Fahrzeugs eingeschätzt wird, ist für OEMs aus Wettbewerbsgründen eine eigene Produktion zu erwägen. Die Relevanz des E-Motors im Fahrzeug entscheidet maßgeblich, ob die Fahrzeughersteller weiter eine Inhouseproduktion verfolgen oder den E-Motor zukünftig als Bestellteil möglichst kostenoptimiert zukaufen.

Für Tier-1-Lieferanten hingegen birgt die aktuelle Entwicklung Risiken, da sich ihre potenziell adressierbare Wertschöpfung entsprechend der Übernahme der Fertigungsprozesse bei den Fahrzeugherstellern reduziert.

Abbildung 48 stellt die Verteilung der in Baden-Württemberg ansässigen Kernunternehmen dar. Anhand der Landkarte ist eine klare Häufung an Unternehmen für die Produktion von elektrischen Traktionsmotoren in der Region Stuttgart zu erkennen. Weitere Standorte liegen in der Region Bodensee, bei Offenburg, Rastatt und um Heilbronn.



4.1.2. Tier-2 und Sublieferanten in Baden-Württemberg

Neben dem Wertschöpfungskern der OEMs und Tier-1-Systemlieferanten tragen auch insbesondere die Tier-2 und weitere Sublieferanten zum Erfolg des automobilen Wirtschaftsstandorts Baden-Württemberg bei. Sie besitzen stetig wachsende Produkt- und Produktionskompetenzen. Diese sind für die Wertschöpfungskette und das vollständig ausgeprägte regionale Branchencluster unerlässlich. Die Sublieferanten zählen zum erweiterten Wertschöpfungscluster und beliefern die Systemlieferanten und OEMs. Zu diesen Unternehmen zählen beispielsweise Material- und Komponentenlieferanten. Allein in der Materialfertigung waren 2017 ca. 26.000 Mitarbeitende beschäftigt. Dies verdeutlicht deren große industrielle, aber auch wirtschaftliche Bedeutung (e-mobil BW GmbH, 2019), zeigt jedoch im Gegensatz zu den Beschäftigten bei Fahrzeugherstellern sowie Tier-1- und Tier-2-Unternehmen die eher untergeordnete Rolle der Materialfertigung in Baden-Württemberg.

Bei der Produktion von E-Motoren können Tier-2-Unternehmen typischerweise große Teile der Fertigung von Subkomponenten durchführen. Diese umfassen Arbeiten wie Stanzen, Tiefziehen, Fräsen, Drehen oder Schneiden und können Tätigkeiten zur Produktion der Welle, des Blechpakets oder des Gehäuses sein. Die Analyse der Herstellerlandschaft in Kapitel 4.1.1 zeigt beispielsweise, dass in Baden-Württemberg 15 Unternehmen das Potenzial für die integrierte Fertigung des Blechpakets aufweisen. Die Herstellung des Gehäuses, inklusive Urformen und anschließender spanender Bearbeitung, können zwölf Unternehmen abbilden. Zudem besitzen 14 Unternehmen die Kompetenz zur Fertigung der Welle inklusive des Auswuchtprozesses. Dazu besitzen diese Unternehmen bereits Erfahrungen im Bereich Automobil- bzw. Großserienfertigung.

Als Beispiele können hier Unternehmen wie die Grohmann ALUWORKS GmbH & Co. KG, die Druckguss Waghäusel GmbH und die GSTech GmbH zur Fertigung des Gehäuses, die Erich Grau GmbH und die Metallwarenfabrik Gemmingen GmbH zur Fertigung des Blechpakets und die Harry Roth GmbH & Co. KG sowie die Schauber GmbH zur Fertigung von Wellen angeführt werden.

Bei einer Gegenüberstellung der Anzahl an Sublieferanten für die einzelnen Subkomponenten (Blechpakete, Welle und Gehäuse) mit den Unternehmen, die die Fähigkeiten zur Montage von E-Motoren besitzen, wird deutlich: **Die Montagekompe-**

tenzen in Baden-Württemberg liegen im Fokus des Branchenclusters. Die Fertigung von Subkomponenten spielt im direkten Vergleich aufgrund der hohen Produktionskosten im Land sowie der relativ geringen Herstellstückzahlen von elektrischen Traktionsmotoren aktuell eine eher untergeordnete Rolle. Die Verteilung der Tier-2- und Tier-n-Sublieferanten über Baden-Württemberg zeigt die in Abbildung 49 dargestellte Landkarte. Dabei kann im Vergleich zu den OEMs und Tier-1-Lieferanten keine zentrale Häufung der Subkomponentenfertiger beobachtet werden.

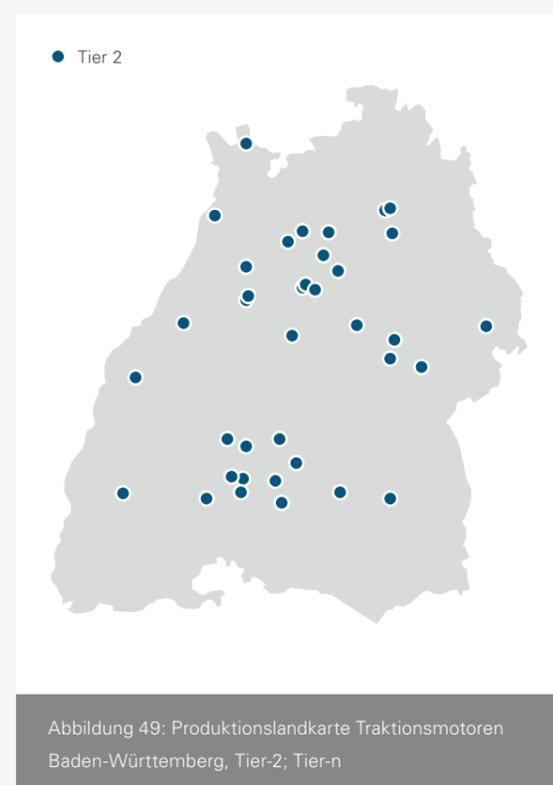


Abbildung 49: Produktionslandkarte Traktionsmotoren Baden-Württemberg, Tier-2; Tier-n

Es kann festgehalten werden, dass die Kompetenzen zur Subkomponentenfertigung in Baden-Württemberg vorhanden sind. Die Produktion wird jedoch bislang nur zu geringen Anteilen durch regionale Tier-2- und Tier-n-Unternehmen durchgeführt. Im Gefolge der in Kapitel 4.1.1 aufgezeigten partiellen Kompetenzverschiebung von den Tier-1-Lieferanten in Richtung der Fahrzeughersteller sowie steigender Herstellstückzahlen wird jedoch erwartet, dass es zu einer stärkeren Lokalisierung der Subkomponentenfertigung kommen wird.

4.1.3. Hersteller- und Kompetenzlandkarte Baden-Württemberg

Basierend auf der in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 durchgeführten Analyse zur E-Motoren- und (Sub-)Komponenten-Herstellerlandschaft Baden-Württembergs wurde anschließend eine Bewertung der vorhandenen Kompetenzen und ihrer Lokalisierung durchgeführt. Mittels der diskutierten Strategien der Hersteller konnten der aktuelle Status sowie eine voraussichtliche Entwicklung des Kompetenzportfolios abgeleitet werden.

Die Auswertung der Produktionsstandorte zeigt, dass die OEMs Daimler AG und Dr. Ing. h.c.F. Porsche AG ebenso wie verschiedene große Tier-1-Zulieferer wie die Robert Bosch GmbH oder die Mahle GmbH im Raum Stuttgart ansässig sind. Diese Region gilt als dominierende Automobilregion in Baden-Württemberg, in der aktuell ca. 55% des landesweiten Umsatzes auf die Automobilindustrie zurückzuführen ist (e-mobil BW GmbH, 2019). Dahingegen gibt es eine deutlich breitere Verteilung der Tier-2, Tier-n und weiterer Tier-1-Lieferanten über das Land. Bei den Zulieferern, die das Potenzial zum Subkomponentenfertiger für die Automobilindustrie besitzen, kann keine klare räumliche Abgrenzung getroffen werden. Es existieren folglich keine feststellbaren regionalen Schwerpunkte.

Ferner wurde analysiert, zu welchem Anteil Kompetenzen für die Fertigung des Rotors, des Stators, des Gehäuses und der Endmontage bei den OEMs, Tier-1- und Tier-2- bzw. Tier-n-Unternehmen vorhanden sind (siehe Abbildung 50). Die Ergebnisse dieser Analyse sind mittels einer Skala von 0–100%

dargestellt. Wenn beispielsweise kein OEM heute Kompetenzen zur Fertigung des Rotors besitzt, wird der Wert 0% angesetzt. Können hingegen alle OEMs die gesamte Fertigung des Rotors übernehmen wird der Wert 100% angesetzt. In der Kompetenzbewertung wurde zudem berücksichtigt, zu welchem Anteil Fertigungsschritte zur Gesamtwertschöpfung der Komponenten bzw. des E-Motors beitragen (siehe Abbildung 46). So hat beispielsweise die Welle einen Anteil von 68% an der Wertschöpfung des Rotors und geht folglich mit 68% in die Kompetenzbewertung der Rotorfertigung ein. Die Kompetenz zur Fertigung des Blechpakets wird analog mit 9% und die zur Herstellung und Bearbeitung des Gehäuses mit 23% berücksichtigt.

Zunächst werden die OEMs als oberste Stufe der Wertschöpfung betrachtet. Dabei zeigt sich, dass diese aktuell nur sehr wenige direkte Kompetenzen zur Herstellung der E-Motoren-Komponenten Rotor, Stator und Gehäuse ausgeprägt haben (siehe Abbildung 50). Das heißt, dass so gut wie alle Komponenten zugekauft werden und die Kompetenzen folglich als 0% angesehen werden. Ebenso wird die Endmontage des Motors nur teilweise von den Fahrzeugherstellern durchgeführt. Innerhalb der aktuellen Wertschöpfungsstrukturen erfolgt die Assemblierung durch Tier-1-Systemlieferanten. Die OEMs spezifizieren typischerweise die gewünschte Technologie, die Leistung und den Bauraum des E-Motors oder der E-Achse für ein Fahrzeug. Die Tier-1-Zulieferer übernehmen dann Entwicklung, Komponentenerprobung und Fertigung. Porsche jedoch hat kürzlich begonnen, die Endmontage der E-Achse inkl. des E-Motors teilweise inhouse durchzuführen.

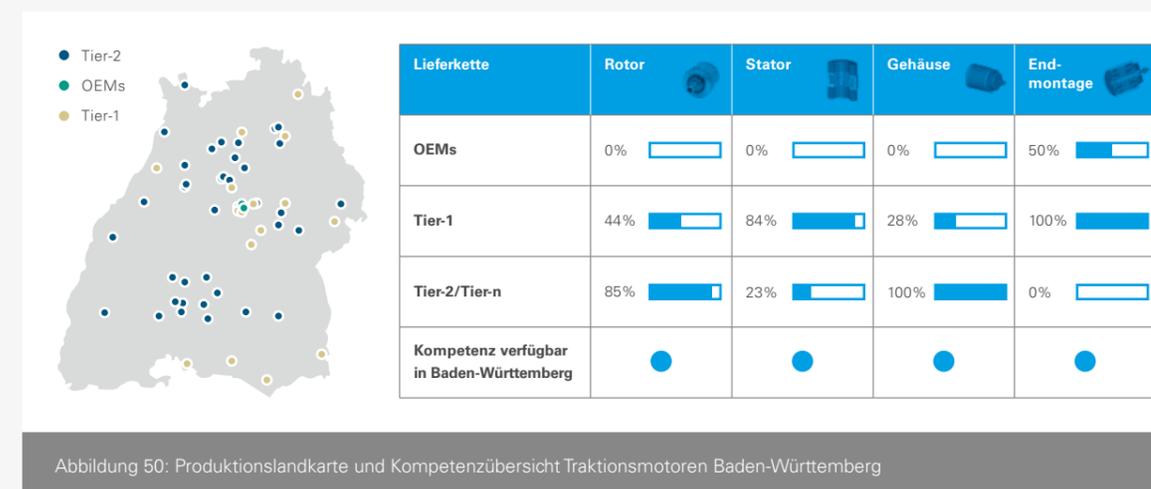


Abbildung 50: Produktionslandkarte und Kompetenzübersicht Traktionsmotoren Baden-Württemberg

Die Tier-1-Zulieferer haben im aktuellen Gefüge der Wertschöpfungskette die Kompetenzen, um die Assemblierung des E-Motors (Montage des Stators inklusive der Wicklung) vollständig (100 %) übernehmen zu können, wohingegen die Fertigung von Subkomponenten zu weiten Teilen an die Tier-2-Zulieferer ausgelagert wird oder nicht in Baden-Württemberg verortet ist. Die Fertigung der Bestandteile des Rotors (wie Blechpaket und Welle), des Stators (wie Blechpaket) und des Gehäuses finden meist bei den Tier-2-Zulieferern oder in Joint Ventures der Tier-1-Lieferanten statt. Dies umfasst dabei Arbeiten wie Drehen, Wuchten, Druckgießen, Fräsen, Stanzen und Paketieren, wie in Kapitel 2.2 beschrieben. Die Detailanalyse der E-Motor- und Komponentenhersteller zeigt, dass vor allem Kompetenzen für die Fertigung des Stators und die Assemblierung des Motors bei den Tier-1-Unternehmen (84%) ausgeprägt sind. Kompetenzen zur Fertigung des Rotors (85%) und des Gehäuses (100%) liegen zumeist bei den Tier-2- bzw. Tier-n-Unternehmen oder den Joint Ventures außerhalb Baden-Württembergs.

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass in **Baden-Württemberg grundsätzlich alle Kompetenzen zur Fertigung des E-Motors existent sind. Ausgeprägte Montagekompetenzen** liegen vor allem bei den Tier-1-Unternehmen vor. Diese bieten bereits heute diverse elektrische Traktionsmotoren für xEV-Applikationen an. Die Kompetenzen zur (Sub-)Komponentenfertigung sind ebenso im Land vorhanden. Eine Großserienfertigung seitens der Tier-2- und Tier-n-Unternehmen ist jedoch aktuell im Vergleich zu den Montagekompetenzen relativ geringer ausgeprägt. **Die (Sub-)Komponenten werden aufgrund ihrer Kostensituation und der relativ geringen Serienstückzahl im Vergleich zum Produktionsvolumen des Verbrennungsmotors verstärkt auf dem internationalen Beschaffungsmarkt zugekauft.**

4.2. Wertschöpfungspotenziale und Beschäftigungseffekte bei der Herstellung elektrischer Antriebsmotoren in Baden-Württemberg

Der steigende Bedarf an elektrischen Traktionsmotoren sowie die vorhandenen Fertigungskompetenzen eröffnen die Chance für Unternehmen aus Baden-Württemberg, von dieser Entwicklung zu profitieren und neue Wertschöpfungspotenziale zu erschließen.

Gelingt es, ähnlich große Marktanteile an der europäischen Wertschöpfung von elektrischen Traktionsmotoren zu erreichen, wie es derzeit bei Verbrennungsmotoren der Fall ist, können neue Arbeitsplätze entstehen.

Für nachfolgende Berechnungen des europaweiten Wertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs im Produktcluster der elektrischen Antriebsmotoren werden 8% als konstanter Wert verwendet. Die Ableitung erfolgte auf Basis der Strukturstudie BW^e mobil 2019. Im Rahmen der Strukturstudie wurde für das Basisjahr 2019 ein Anteil Baden-Württembergs von 3–5% an der europaweiten Wertschöpfung im Bereich „neuer Komponenten“ abgeleitet, darunter Batteriesysteme, Leistungselektronik und elektrische Motoren aller Leistungsklassen. Der angenommene Wert für E-Motoren wurde vom Konsortium aufgrund der folgenden Argumente festgesetzt.

1. Ein erhöhtes technisches Differenzierungspotenzial im Produktfeld elektrischer Antriebsmotoren gegenüber handelsüblicher E-Motoren-Varianten (Fensterheber, Sitzsteller, Kleinstmotoren ...)
2. Die Ansässigkeit bereits etablierter Unternehmen im Bereich elektrischer Antriebsmotoren wie Porsche AG, Robert Bosch GmbH, ZF Friedrichshafen AG, Schaeffler AG, Mahle GmbH etc. in Baden-Württemberg
3. Die im direkten Vergleich bereits fortgeschrittenere Integration Baden-Württembergs im Bereich E-Motoren gegenüber den Produktclustern Lithium-Ionen-Batterie und Leistungselektronik

Die Autoren des Themenpapiers nehmen an, dass der Wertschöpfungsanteil Baden-Württembergs in Höhe von 8 % am europäischen Markt bis 2030 konstant bleibt. Gründe hierfür liegen trotz des prognostizierten starken Marktwachstums

im Produktcluster elektrischer Antriebssysteme bis zum Jahr 2030 im globalen Sourcing und Wettbewerb insbesondere mit Asien.

Die realen Entwicklungszahlen müssen entsprechend den in Baden-Württemberg getätigten Investitionen und der Firmenaufstellung gemonitort werden, um entlang der Transformation aktuelle Aussagen zum realen Marktanteil treffen zu können.

Zur Herleitung dieser Beschäftigungseffekte wird zunächst das Wertschöpfungspotenzial für Baden-Württemberg bestimmt. Die Ableitung erfolgt auf Basis der globalen Marktpotenziale entlang der Wertschöpfungskette und der Bewertung des Wertschöpfungspotenzials nach:

- Traktionsmotorenart
- vorhandenen Kompetenzen zur Fertigung von E-Motoren in Baden-Württemberg
- dem möglichen Anteil des Landes an den globalen bzw. europäischen Produktionsvolumen

Im Folgenden werden die Trends in der E-Motoren-Entwicklung und der Fertigung seitens der OEMs und Zulieferer sowie die impliziten Auswirkungen auf die Wertschöpfung in Baden-Württemberg bis 2030 beschrieben. Am Ende des Kapitels 4 werden die Beschäftigungseffekte in der E-Motoren-Produktion auf Basis der im Land gefertigten E-Motoren-Stückzahl und die entsprechende Wertschöpfungstiefe bestimmt.

4.2.1. Wertschöpfungspotenzial in Baden-Württemberg

Der Automobilstandort Baden-Württemberg wird sich durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs wandeln und immer größere Teile des Umsatzes müssen anstelle von Verbrennungsmotoren und seinen Komponenten durch E-Motoren und weitere Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs erwirtschaftet werden. Im Folgenden soll für Baden-Württemberg das Wertschöpfungspotenzial abgeleitet werden, das durch die Fertigung von E-Motoren generiert werden kann (siehe Abbildung 51). Zur Herleitung wird zunächst das weltweite Marktpotenzial elektrischer Traktionsmotoren betrachtet, das in Kapitel 3.2 diskutiert wurde. Heutzutage findet zumeist eine regionale Produktion von

PKW für den jeweiligen Markt statt. Das heißt, ein Großteil der in der EU gefertigten PKW wird auch innerhalb der EU verkauft. Ein Beispiel zur Verdeutlichung: Im Jahr 2015 wurden 205.000 der in Deutschland produzierten PKW nach China exportiert, wohingegen 4 Mio. PKW deutscher OEMs in China gefertigt wurden (e-mobil BW GmbH, 2019). Durch die vornehmlich lokale Produktion wird die Herleitung des Wertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs auf das europäische Marktpotenzial bezogen. Gewünscht wird ein weiterhin hoher Wertschöpfungsanteil Baden-Württembergs in Europa. Bei klassischen Automobil-Zulieferteilen kommen etwa 9 % der europäischen Produktion aus Baden-Württemberg, bei einzelnen Teilen wie Getrieben und Getriebeteilen (12 %) und Teilen für Kolbenverbrennungsmotoren (14 %) ist der Wert sogar deutlich höher. Für den Wertschöpfungsanteil des E-Motors am europäischen Marktpotenzial wird, basierend auf der Strukturstudie BW^e mobil 2019, der in diesem Themenpapier nach oben korrigierte Wert von 8% verwendet. Das ist bereits eine deutliche Steigerung gegenüber bisherigen Produktionsanteilen vergleichbarer Bauteile und Systeme (E-Motoren 5 %, Batterien 3 %, elektronische Bauteile 4 %), wie sie in der Strukturstudie BW^e mobil 2019 ausgewiesen wurden.

Die Ableitung des Wertschöpfungspotenzials über das gesamte Marktpotenzial für E-Motoren erfolgt mittels der Differenzierung zwischen Produktions- und Materialkosten, da aktuell vorrangig nur die Produktionskosten zur wirtschaftlich erbrachten Leistung aus Baden-Württemberg beitragen. Aus dem aktuellen Marktpotenzial des Landes am gesamteuropäischen E-Motoren-Markt und den im Land vorhandenen Kompetenzen zur E-Motoren-Fertigung kann schließlich ein unter optimalen Bedingungen erreichbares „**Best-Case-Szenario**“ für die Entwicklung des Wertschöpfungspotenzials in Baden-Württemberg hergeleitet werden.

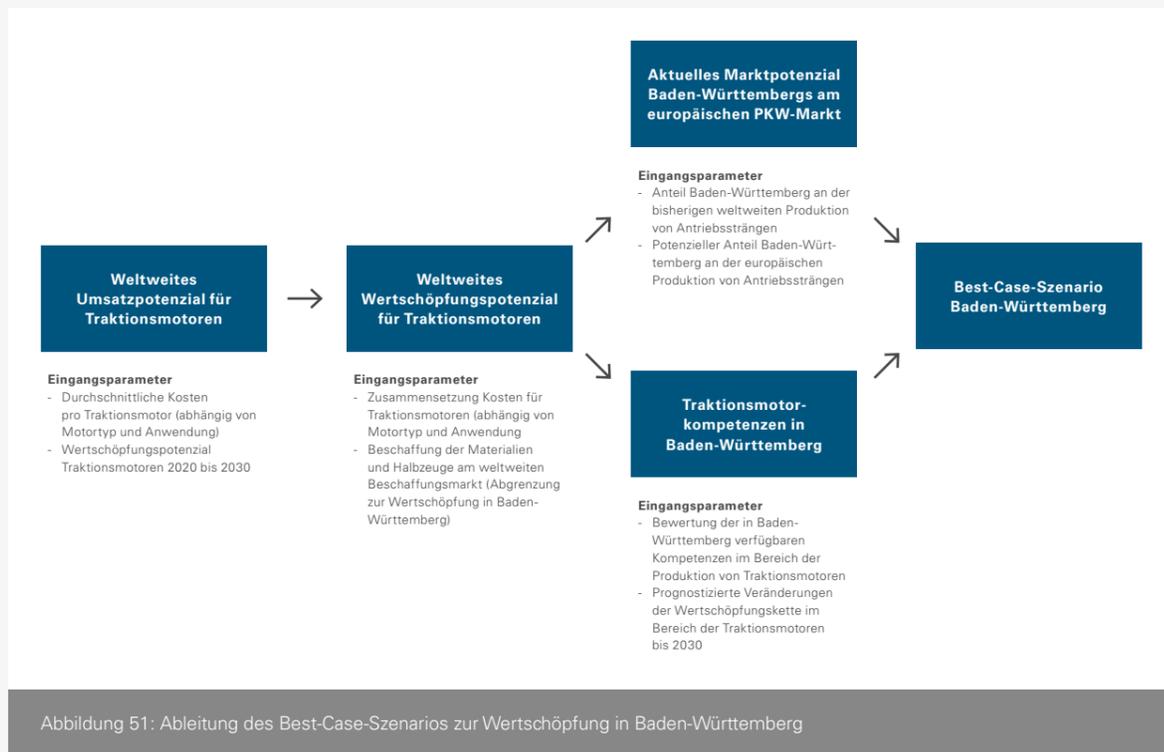
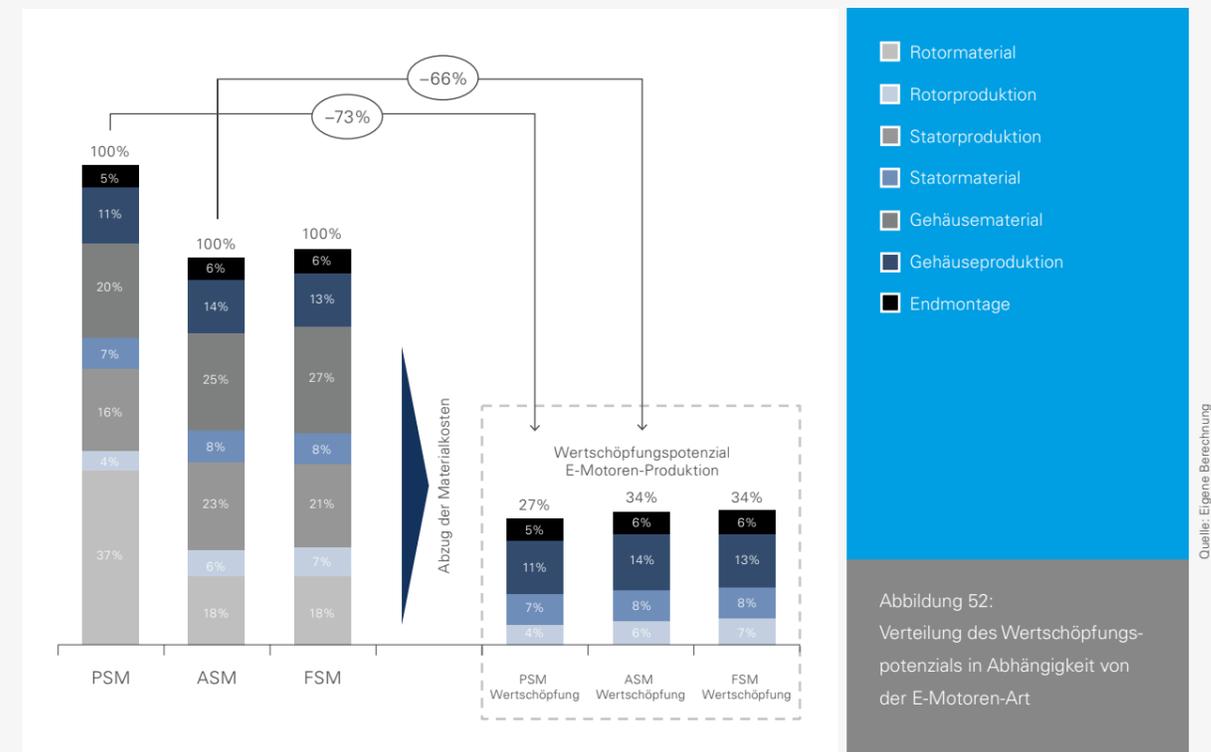


Abbildung 51: Ableitung des Best-Case-Szenarios zur Wertschöpfung in Baden-Württemberg

In Kapitel 3.2.2 wurde das voraussichtliche **globale Marktpotenzial für elektrische Traktionsmotoren** mit 5,17 Mrd. € für das Referenzjahr 2020 abgeleitet. **Das europäische Marktpotenzial beträgt davon 1,09 Mrd. €, was einem Anteil von ca. 21% entspricht.** Die Ableitung des europäischen Wertschöpfungspotenzials vom Marktpotenzial erfolgt anhand der Betrachtung von Material- und Produktionskosten. Vom gesamten Marktpotenzial entfallen je nach Traktionsmotorenart verschiedene Anteile auf Materialkosten und Produktionskosten, wie in Kapitel 3.2.1 dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Materialkosten nicht zur im Land erbrachten Wirtschaftsleistung und adressierbaren Wertschöpfung beitragen. Des Weiteren ist zu beachten, dass neben den Rohstoffen auch die Produktion der Halbzeuge wie Wickeldraht, Elektrolech, Isolationsmaterialien oder Strangpressprofile zumeist nicht in Baden-Württemberg stattfindet. Diese Materialien werden global gehandelt und vornehmlich auf Basis bereits bestehender Lieferketten zugekauft. Durch den Einkauf dieser Erzeugnisse umfassen die Materialkosten im Rahmen dieser Betrachtung auch die Kosten der Halbzeuge (inklusive der damit einhergehenden Fertigungs- und Vertriebsge-

meinkosten „SG&A: Selling, General and Administrative Expenses“ und Margen auf Materialerzeugerebene).

Das adressierbare Wertschöpfungspotenzial für E-Motoren in Baden-Württemberg beträgt nach Abzug der Materialkosten 27% für PSM und jeweils 34% für ASM bzw. FSM (siehe Abbildung 52). Die Materialkosten für PSM sind aufgrund der in Kapitel 1 diskutierten hohen Preise der verwendeten seltenen Erden höher als für die Motorarten ASM und FSM.

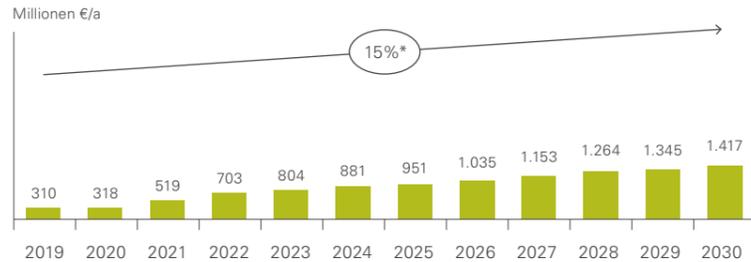


Abgeleitet vom gesamten europäischen Marktpotenzial für elektronische Traktionsmotoren von 1,09 Mrd. € im Jahr 2020 **beträgt das für Baden-Württemberg adressierbare Marktpotenzial** gemäß der Herleitung **ca. 318 Mio. €**. Dies entspricht einem **Anteil von ca. 29% des gesamten europäischen Marktpotenzials**. Dieser Anteil wurde mittels des adressierbaren Wertschöpfungsanteils je E-Motoren-Bauart für PSM, ASM und FSM inklusive einer entsprechenden Gewichtung entsprechend der Marktdurchdringung der jeweiligen Motorarten errechnet. Das durchschnittliche Wachstum des Wertschöpfungspotenzials beträgt in Analogie zur Entwicklung der Gesamtwertschöpfung in Europa 15% CAGR und wird bis im Jahr 2030 auf ca. 1,4 Mrd. € angewachsen (siehe Abbildung 53).

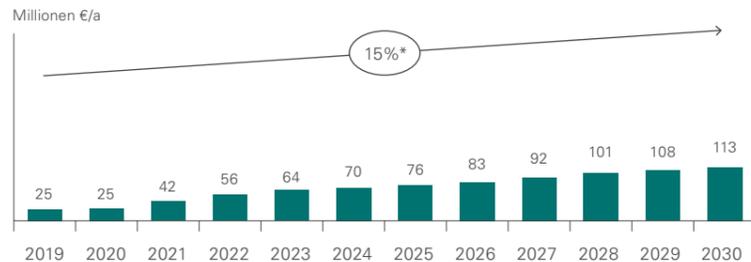
Zur Ermittlung des Wertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs für E-Motoren im „Best-Case-Szenario“ wird zudem berücksichtigt, inwieweit die Kompetenzen zur Fertigung im Land existieren und welche Entwicklungen die Kompetenzlandschaft voraussichtlich durchläuft. In Kapitel 4.1 wurde die Herstellerlandschaft analysiert – aus der Analyse wurde abgeleitet, dass die Kompetenzen zur Fertigung

aller E-Motoren-Komponenten in Baden-Württemberg vorhanden sind. Bis zum Jahr 2030 wird es voraussichtlich zu einer Verschiebung der Kompetenzen zwischen den OEMs und Zulieferern kommen. Doch hat eine vertikale Integration in Rahmen dieses Szenarios keinen Einfluss auf die im Land abgebildeten Kompetenzen, da bereits heute alle Kompetenzen vorhanden sind.

Wertschöpfungspotenzial Europa



Wertschöpfungspotenzial Baden-Württemberg



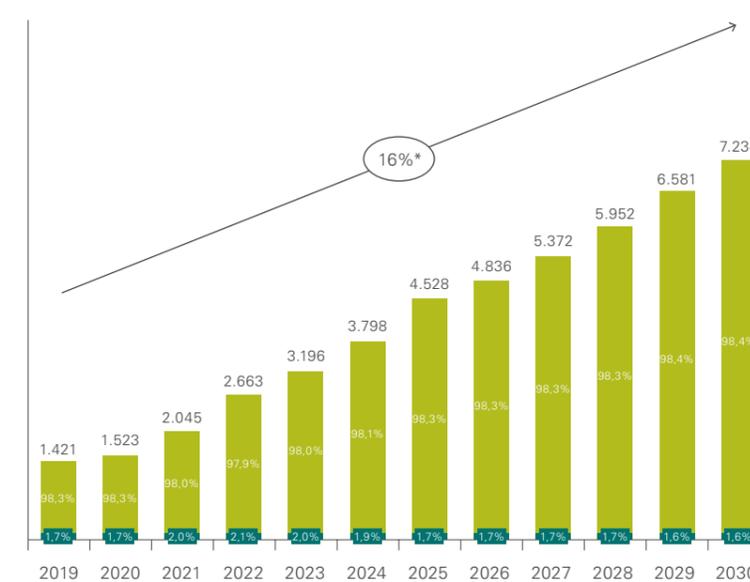
- Wertschöpfungspotenzial Traktionsmotoren Produktion EU
- Wertschöpfungspotenzial Traktionsmotoren Produktion Baden-Württemberg

* CAGR
 ** Vergleiche Herleitung in Kapitel 4.2

Abbildung 53: Ableitung des Wertschöpfungspotenzials von Baden-Württemberg vom europäischen Wertschöpfungspotenzial

Quelle: Abbildungen: Basis: Renault, Deutschland AG, Toyota Deutschland GmbH; Mittel: Honda Motor Europe Ltd., VW AG, Premium; Daimler AG, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Millionen €



- Wertschöpfungspotenzial Global
- Wertschöpfungspotenzial Baden-Württemberg

* CAGR

Abbildung 54: Wertschöpfungspotenzial Baden-Württembergs am Weltmarkt für Traktionsmotoren in Mio. €

Quelle: Eigene Berechnung

Unter Berücksichtigung aller oben genannten Prämissen wurde folgend das „Best-Case-Szenario“ abgeleitet (siehe Abbildung 53). **Das angestrebte Wertschöpfungspotenzial an der Fertigung elektrischer Traktionsmotoren im Jahr 2020 beträgt in diesem Szenario ca. 25 Mio. € und wird sich bis 2030 auf ca. 113 Mio. € steigern.** Die Grundlage für die Erreichung des Best-Case-Szenarios ist die Fertigung aller Subkomponenten in Baden-Württemberg. Aktuell werden jedoch Komponenten aus der EU und weltweit zugekauft. **Deshalb sollte eine Integration der zugekauften (Sub-)Komponenten in die Produktionslandschaft Baden-Württemberg angestrebt werden,** um die Fertigung von Subkomponenten entsprechend zu verlagern. Dieses Vorhaben wird durch einen starken Wettbewerbsdruck, vorrangig aus Ländern mit günstigeren Kostenstrukturen, erschwert. Eine Unterstützung durch staatliche Subventionen in der Phase des Umschwungs könnte hierbei einen Wettbewerbsvorteil ermöglichen. Im folgenden Kapitel 5 wird ausgehend vom „Best-Case-Szenario“ ein „Realistic-

Case-Szenario“ abgeleitet. Dieses beinhaltet zusätzlich die Ergebnisse der Untersuchung der weltweiten Produktionsnetzwerke und eine realistische Wertschöpfungsstruktur der Subkomponenten bezogen auf den Standort Baden-Württemberg.

Abschließend wird der **landesweite Anteil der Wertschöpfung elektrischer Antriebsmotoren** im Verhältnis zum Weltmarkt aufgezeigt (siehe Abbildung 54). Das globale Wertschöpfungspotenzial beträgt im Jahr 2020 ca. 1,5 Mrd. € und wird sich bis 2030 auf ca. 7,3 Mrd. € steigern. Mit 25 Mio. € beträgt der Anteil Baden-Württembergs 2020 ca. 1,7 % an der globalen Wertschöpfung. Der prozentuale Anteil schwankt dabei jährlich leicht zwischen 1,6% und 2,1%. Diese Schwankungen sind auf die unterschiedlichen Entwicklungen der Elektrifizierung der Fahrzeuge sowie des Marktwachstums in den Kernmärkten China, Nordamerika und Rest of the World (ROW) im Vergleich zum europäischen Markt zurückzuführen.

4.2.2. Veränderung der Wertschöpfung durch Trends im Bereich der E-Motoren- und Produktionstechnologie

In Kapitel 4.1.3 wurde ein Überblick über die Kompetenzverteilung zur Fertigung von E-Motoren innerhalb der Herstellerlandschaft Baden-Württembergs gegeben. Die Analyse zeigte, dass alle Kompetenzen zur Fertigung von E-Motoren im Land grundsätzlich vorhanden sind und sowohl OEMs als auch Tier-1- und Tier-2-Unternehmen an der Wertschöpfung beteiligt sein werden. Im Folgenden wird eine durch die OEMs angekündigte Verschiebung der Lieferketten und eine damit einhergehende Verschiebung der Wertschöpfung diskutiert – abgeleitet aus einem Vergleich zwischen den Jahren 2020 und 2030 (siehe Tabelle 2).

Die angekündigten strategischen Entscheidungen der Fahrzeughersteller hin zu einer vertikalen Integration beeinflussen die Verschiebung der adressierbaren Wertschöpfungsanteile zwischen den OEMs und den Lieferanten maßgeblich. Doch auch die Tier-1- und Tier-2-Unternehmen können zu

einer Veränderung der Wertschöpfungsverteilung beitragen, beispielsweise durch eine stärkere regionale Integration von Produktionsschritten bei der Subkomponentenfertigung (vertikale Upstream-Integration) in Baden-Württemberg. Zur Analyse einer potenziellen Verschiebung der Wertschöpfungsanteile innerhalb der aktuellen Unternehmenslandschaft werden vier Hauptentwicklungsfelder diskutiert:

- die Entwicklung von Traktionsmotoren
- die Erprobung von Traktionsmotoren
- die Produktion der Subkomponenten wie Blechpaket, Welle und Gehäuse
- der Zusammenbau von Rotor, Stator und Gesamtsystem

Dabei werden je Hauptentwicklungsfeld die positiven, neutralen oder negativen Einflüsse durch eine potenzielle Verlagerung für das Land Baden-Württemberg bewertet.

	2020	2030	Bewertung aus Sicht Baden-Württembergs
Entwicklung Traktionsmotor	<ul style="list-style-type: none"> Die Fahrzeughersteller spezifizieren die benötigten Traktionsmotoren und beschaffen diese größtenteils als bereits entwickelte Systeme Entwicklung, Fertigung und Know-how-Aufbau finden größtenteils beim Tier-1-Lieferanten als Gesamtwerkstatt statt 	<ul style="list-style-type: none"> Durch die Zunahme der Verkaufszahlen der xEV rückt der Traktionsmotor bei den Fahrzeugherstellern stärker in den Fokus der Kernwertschöpfung, wohingegen der reine Verbrennungsmotor an Bedeutung verliert Eine Eigenentwicklung von Elektrotraktionsmotoren wird als Folge bei vielen Fahrzeugherstellern erwartet, in Kombination mit Inhousefertigungen Tier-1-Lieferanten bieten weiterhin Traktionsmotoren für Fahrzeughersteller an, die keine Eigenentwicklung durchführen 	 <p>Verlagerung der Entwicklung zum Fahrzeughersteller</p>
Erprobung Traktionsmotor	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeughersteller erproben den integrierten elektrischen Antriebsstrang im Fahrzeug und auf Prüfständen Die Komponentenerprobung findet hauptsächlich bei den Tier-1-Lieferanten statt 	<ul style="list-style-type: none"> Bei einer Eigenentwicklung der Traktionsmotoren durch den Fahrzeughersteller wird eine Komponenten- sowie Gesamtsystemerprobung durch den Hersteller selbst erwartet und ist vom Entwicklungsablauf her zu präferieren Bei Zukauf von Traktionsmotoren findet weiterhin die Komponentenerprobung hauptsächlich durch den Tier-1-Systemlieferanten statt und die Erprobung des Gesamtsystems durch den Fahrzeughersteller 	 <p>Verlagerung der Erprobung entsprechend der Entwicklung</p>
Produktion der Subkomponenten <ul style="list-style-type: none"> Blechpaket Welle Gehäuse 	<ul style="list-style-type: none"> Die benötigten Subkomponenten für die Produktion von Traktionsmotoren werden vorwiegend auf dem weltweiten Beschaffungsmarkt zugekauft und je nach Komponente in bestimmten Regionen gefertigt 	<ul style="list-style-type: none"> Es findet eine stärkere Integration der Komponentenfertigung für den Traktionsmotor beim Fahrzeughersteller und Tier-1-Lieferanten aufgrund zunehmender Marktkonsolidierung statt (beispielhaft hat dies die Daimler AG bereits für die Komponentenfertigung im Stammwerk Untertürkheim im Zuge des Aufbaus des e-Campus angekündigt) 	 <p>Lokale Integration der Wertschöpfung aus Best Cost Countries</p>
Zusammenbau Rotor, Stator und Gesamtsystem	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeughersteller kaufen größtenteils den gesamten Antriebsstrang bzw. die Traktionsmotoren weltweit zu Zusammenbau von Rotor, Stator und Gehäuse findet hauptsächlich beim Tier-1-Lieferanten statt Technologisch führende Fahrzeughersteller haben begonnen, Inhousefertigungen für die Endmontage von E-Motoren aufzubauen (BMW, VW etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Der Zusammenbau und die finale Qualitätsprüfung (End of life Test) von Rotor, Stator und Gehäuse bzw. E-Achse wird vom OEM als Kernwertschöpfung angesehen und überwiegend inhouse durchgeführt Tier-1-Lieferanten übernehmen weiterhin den Zusammenbau von Rotor, Stator und Gehäuse (E-Achse) für die Fahrzeughersteller, die keine Eigenwertschöpfung und Entwicklung aufbauen können, z. B. aufgrund von zu kleinen Produktionsvolumen 	 <p>Verlagerung der Wertschöpfung vom Tier-1 zum Fahrzeughersteller</p>

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 2: Prognostizierte Veränderung der Wertschöpfung durch Trends im Bereich der E-Motoren- und Produktionstechnologie

Entwicklung von Traktionsmotoren

Aktuell findet die Forschung und Entwicklung elektrischer Traktionsmotoren typischerweise auf Tier-1-Zuliefererebene statt. So entwickeln beispielsweise die Robert Bosch GmbH, die Mahle GmbH und die ZF Friedrichshafen AG ihre E-Motoren inhouse und bieten den OEMs bedarfsgerechte Produktlösungen an. Dies steht im Kontrast zur vorherrschenden Struktur aktueller Wertschöpfungsketten im Bereich der herkömmlichen Verbrennungsmotoren in Deutschland. Bei diesen Fahrzeugen werden sowohl die Gesamtentwicklung als auch die Montage hauptsächlich von den OEMs durchgeführt. Es ist bei der Entwicklung von Traktionsmotoren jedoch der Trend zu einer stärkeren vertikalen Integration seitens der OEMs zu erkennen. Als Beispiele können hierfür die Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG mit dem Ausbau des Entwicklungszentrums Weissach und die Daimler AG mit der Gründung des Technologieprogramms „Vision EQXX“ angeführt werden. Die Audi AG hat ebenso die Kompetenzen für die technologische Entwicklung von E-Motoren erweitert, die Fertigung ist dabei aktuell im ungarischen Győr angesiedelt. Dieser Trend kann auch für weitere OEMs mit Hauptsitz außerhalb von Baden-Württemberg festgestellt werden. Beispiele für diese Entwicklung sind die gegründeten Entwicklungsabteilungen der Volkswagen AG, der BMW AG und der PSA Group.

Festzuhalten ist, dass es in Baden-Württemberg im Bereich der Forschung und Entwicklung von E-Motoren ebenso wie in der Produktion bis 2030 zu einer Teilung der Kompetenzen zwischen den Tier-1-Zulieferern und den OEMs kommen wird. Fand die Entwicklung bislang vorwiegend bei den Tier-1-Zulieferern statt, wird sie zukünftig sowohl von den OEMs als auch den Zulieferern vorangetrieben werden.

Aufgrund der Aufteilung der Kompetenzen innerhalb des Landes wird davon ausgegangen, dass diese Trends zum größten Teil keinen Einfluss auf die Wertschöpfung im Land haben werden.

Erprobung von Traktionsmotoren

Die Komponentenerprobung von Traktionsmotoren findet im Rahmen der Forschung und Entwicklung statt. Die Erprobung des E-Motors im Gesamtsystem liegt in der Verantwortung der OEMs. Diese führen die Funktions- und Dauerlauftests entsprechend ihren Qualitätsrichtlinien

durch. Die Erprobung des E-Motors selbst und seiner Komponenten findet entsprechend der Entwicklung und Produktion bei den Tier-1-Lieferanten statt. Durch eine stärkere vertikale Integration der OEMs im Bereich der E-Motoren-Fertigung sowie der Forschung und Entwicklung bis 2030 wird es auch hier zu einer verstärkten Integration der E-Motoren-Erprobung kommen.

In Analogie zur teilweisen Verschiebung der Kompetenzen bei der Entwicklung von Traktionsmotoren hat auch eine stärkere Übernahme der Erprobung durch die Fahrzeughersteller keinen signifikanten negativen oder positiven Einfluss auf das Land Baden-Württemberg.

Produktion der Subkomponenten

Die Fertigung der E-Motoren-Subkomponenten für die Produktion in Baden-Württemberg wird aktuell größtenteils von Tier-2- oder Tier-n-Zulieferern, aber auch teilweise von Tier-1-Lieferanten durchgeführt. Subkomponenten wie die Welle, das Gehäuse oder das Blechpaket werden jedoch meist nicht in Baden-Württemberg hergestellt, sondern auf dem europäischen und internationalen Beschaffungsmarkt zugekauft. Hier kann für das Jahr 2030 eine stärkere vertikale Integration der Komponentenfertigung seitens der Fahrzeughersteller gemäß ihrer Ankündigungen erwartet werden. Als Beispiel ist die Daimler AG zu nennen, die eine Komponentenfertigung für das Werk in Untertürkheim, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, angekündigt hat. Überdies wird angenommen, dass die Fahrzeughersteller ihre Subkomponenten regionaler und damit auf dem europäischen Markt beziehen, entsprechend der Situation beim Verbrennungsmotor (e-mobil BW GmbH, 2019). Dies bietet auch den regional ansässigen Tier-1-Lieferanten die Möglichkeit, sich stärker an der Subkomponentenfertigung für die OEMs zu beteiligen. Eine detaillierte Analyse der aktuellen Lieferketten der Traktionsmotorenproduktion wird in Kapitel 5 geleistet.

Der dieser Bewertung zugrundeliegende Trend zu einer stärkeren Beteiligung der Automobilhersteller an der Subkomponentenfertigung ist für das Land als positiv anzusehen. Es werden Teile der Wertschöpfung des E-Motors vom europäischen Markt in die bereits bestehenden Produktionswerke in Baden-Württemberg integriert und regionale Zulieferer werden stärker in die Produktion eingebunden.

Zusammenbau Rotor, Stator und Gesamtsystem

Es kann erwartet werden, dass es, vergleichbar mit den bereits etablierten Wertschöpfungsketten beim Verbrennungsmotor, bis zum Jahr 2030 zu einer teilweise Verschiebung der Wertschöpfung beim Zusammenbau von E-Motoren kommt. Diese Annahme im Rahmen des vorliegenden Themenpapiers basiert auf den Ankündigungen diverser OEMs und wurde für Baden-Württemberg bereits in Kapitel 4.1.1 beschreiben. Es kommt somit seitens der OEMs somit zu einer teilweisen Integration der E-Motoren-Montage sowie der Montage von Rotor und des Stator.

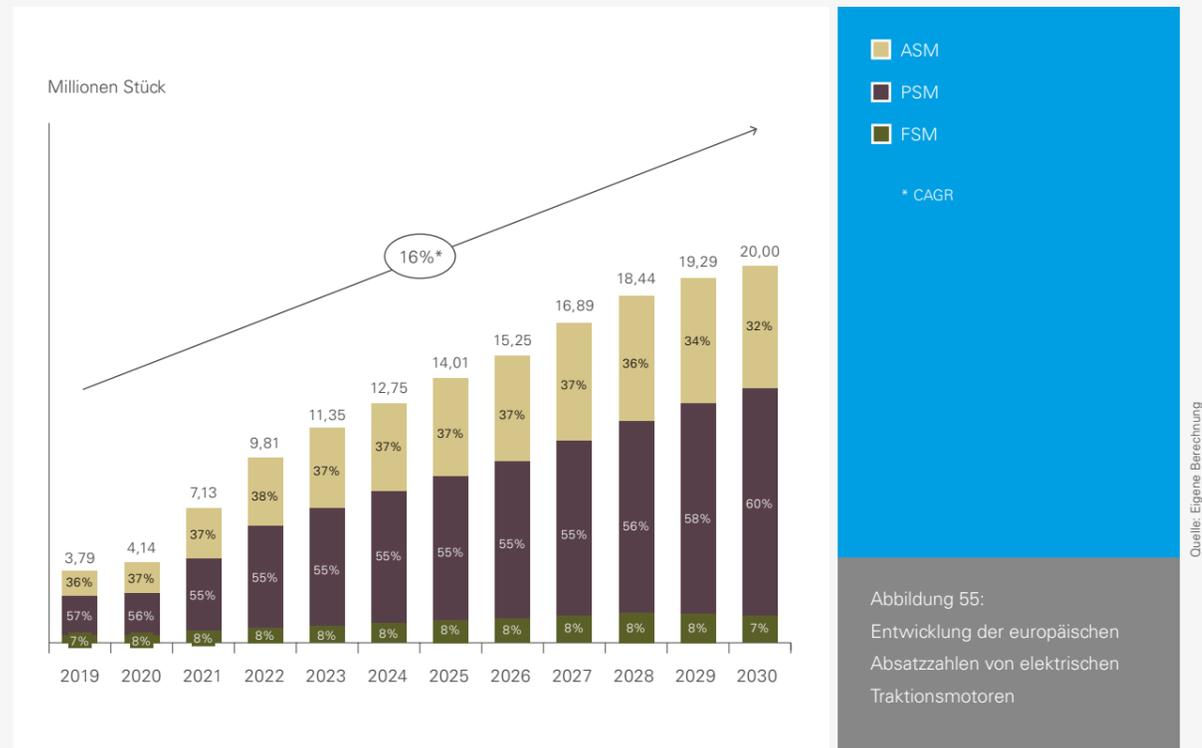
Für die Tier-1-Unternehmen Baden-Württembergs ist der Trend zur Integration der E-Motoren-Produktion durch die lokalen bzw. auch internationalen OEMs mit einer Verringerung der adressierbaren Wertschöpfungsanteile und somit als Risiko zu bewerten. Jedoch wird erwartet, dass die Fahrzeughersteller nicht ihren kompletten Bedarf an E-Motoren bis 2030 inhouse decken werden. Zusätzlich zu den Traktionsmotoren für PKW in Großserie kann davon ausgegangen werden, dass weitere Märkte für Sonderlösungen sowie Traktionsmotoren für Nutzfahrzeuge langfristig aufgrund von Skaleneffekten seitens der Automobilzulieferer entwickelt und gefertigt werden. Im globalen Umfeld gibt es neben den OEMs wie beispielsweise der VW AG, der Daimler AG, der BMW AG und PSA, die eine vertikale Integration im Bereich der E-Motoren anstreben, weiterhin Akteure wie Ford, Geely und Volvo, die ihren strategischen Fokus aktuell nicht auf die Produktion von E-Motoren gelegt haben. Diese bauen mittelfristig auf die Fertigungs- und Entwicklungskompetenzen der Zulieferer. Somit wird es für die Tier-1-Zulieferer angesichts des prognostizierten Marktwachstums auch in Zukunft hohe Wachstumspotenziale bei der E-Motoren-Fertigung und der flankierenden Forschung und Entwicklung geben.

Diese Entwicklungen sind mit Sicht auf Baden-Württemberg auf Basis der Stückzahlprämissen des Best-Case-Szenarios als neutral zu betrachten, da es lediglich zu einer Verschiebung der Wertschöpfungsanteile innerhalb des Landes kommen wird.

Fazit

Für alle Bereiche – die Entwicklung, die Erprobung und die Produktion der Subkomponenten ebenso wie den Zusammenbau von Rotor, Stator und Gesamtsystem – werden Verschiebungen innerhalb der Wertschöpfungskette erwartet. Diese Verschiebungen werden vor allem von den **OEMs durch die stärkere vertikale Upstream-Integration der E-Motoren-Produktion** getrieben – zulasten der Tier-1-Lieferanten. Aber auch Zulieferer können größere Teile der Subkomponentenproduktion durch vertikale Rückwärtsintegration in ihre Produktion aufnehmen. Somit lässt sich ein insgesamt positiver Trend durch die Veränderung der Wertschöpfung in Baden-Württemberg prognostizieren und als „Lokalisierung der Fertigung“ bezeichnen. Dieser Trend wird insbesondere auf der Fertigung der Subkomponenten beruhen, da diese aktuell überwiegend international zugekauft werden.

Um die oben beschriebene Bewertung der potenziellen Veränderung der Wertschöpfung durch die Integration der E-Motoren-Produktion von Fahrzeugherstellern in Baden-Württemberg bis 2030 durchführen zu können, wurde im ersten Schritt eine Auswertung der potenziell verkauften Fahrzeuge der in Baden-Württemberg ansässigen Fahrzeughersteller durchgeführt. Diese Auswertung (basierend auf in Kapitel 3 beschriebenen CO₂-Tools) wurde in Schritt 2 mit den Produktionsstückzahlen des Best-Case-Szenarios abgeglichen. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Auswirkungen der horizontalen Integration auf Basis der Stückzahlen hergestellter E-Motoren zu vergleichen.



4.2.3. Aktuelle und zukünftige Beschäftigungssituation in Baden-Württemberg

Die Entwicklung des Wertschöpfungspotenzials wurde zuvor in Kapitel 4.2.1 diskutiert und wird im Best-Case-Szenario für Baden-Württemberg auf ca. 113 Mio. € im Jahr 2030 beziffert (siehe Abbildung 53).

Die Betrachtung des steigenden Bedarfs an elektrischen Traktionsmotoren und der notwendigen Produktionssteigerung zeigt, dass zwangsläufig auch die Zahl der Mitarbeitenden steigen wird, die erforderlich sind, um die Nachfrage decken zu können. Die Auswirkungen auf die Beschäftigung sollen im Folgenden diskutiert werden, wobei ausschließlich die Fade-in-Effekte untersucht werden. Das bedeutet, dass nur die Schaffung neuer Stellen durch die E-Motoren-Produktion in dieser Diskussion berücksichtigt wird. Dabei werden sowohl die direkt an der Produktion beteiligten Mitarbeitenden als auch die in den indirekten Bereichen benötigten Mitarbeitenden berücksichtigt.

Um die Beschäftigungseffekte durch die Fertigung von E-Motoren auf Baden-Württemberg herleiten zu können, werden zunächst die Entwicklungen des europäischen Marktes für Traktionsmotoren betrachtet. Diese basieren auf den in Kapitel 3.1 diskutierten Fahrzeugzulassungen von xEV in Europa und den Entwicklungen der verschiedenen Antriebstopologien. Somit können Absatzzahlen für E-Motoren in Europa prognostiziert werden (siehe Abbildung 55). Der Bedarf an elektrischen Traktionsmotoren betrug 2020 ca. 4,1 Mio. Stück, wovon 7% auf den FSM, 36% auf den ASM und 57% auf den PSM entfielen. Bis 2030 wird eine Steigerung der Absatzzahlen auf ca. 20 Mio. Motoren erwartet. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 16%. Die Auswirkungen durch die COVID-19-Pandemie (vgl. Kapitel 3.1) sind bereits mitberücksichtigt – sie stellen die Erklärung für die schwache Steigerung der Absatzzahlen zwischen den Jahren 2019 und 2020 dar.

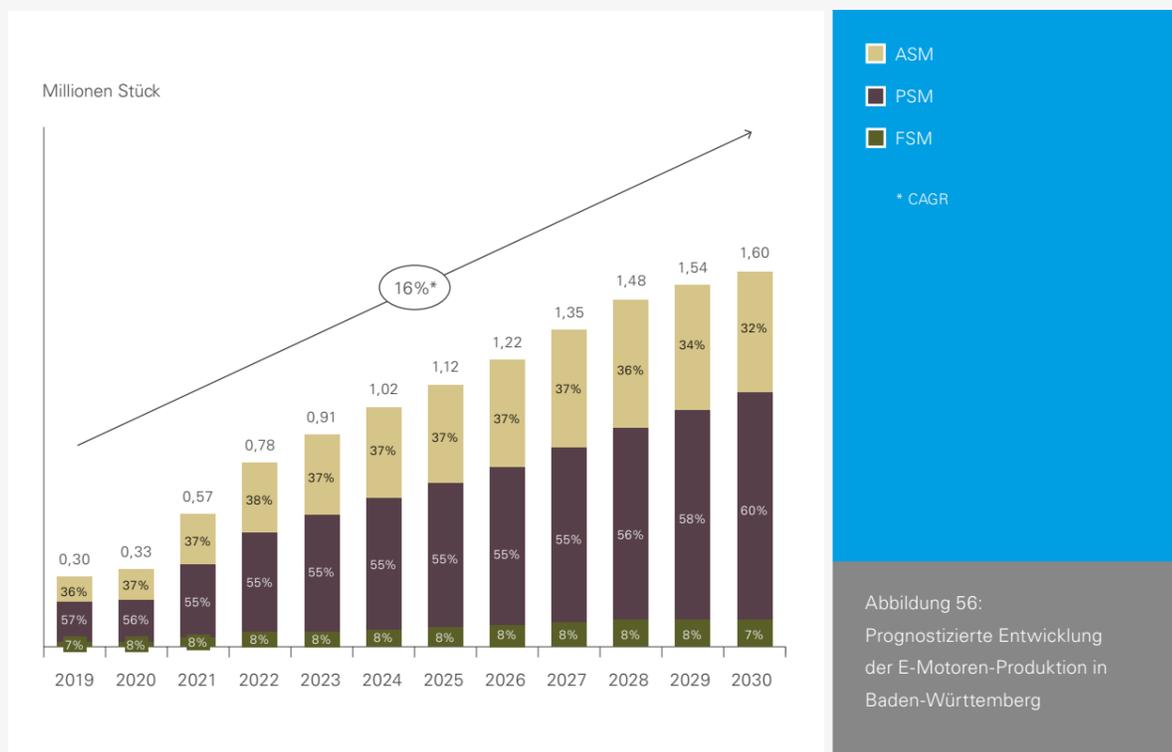


Abbildung 56:
Prognostizierte Entwicklung
der E-Motoren-Produktion in
Baden-Württemberg

Das Produktionsvolumen elektrischer Traktionsmotoren mit Fertigung in Baden-Württemberg kann auf Basis der europäischen Absatzzahlen abgeleitet werden. Wie bei der vorangegangenen Berechnung des Wertschöpfungspotenzials wird auch für die Berechnung der Beschäftigung mit 8% gerechnet. Somit beträgt das Absatzziel 2020 ca. 330.000 E-Motoren und wird sich bis 2030 auf ca. 1,6 Mio. E-Motoren steigern (siehe Abbildung 56).

Zur Ermittlung der Beschäftigtenzahlen aus den jährlich Absatzzahlen von E-Motoren wird zunächst ein Bedarf an Mitarbeitenden pro 200.000 E-Motoren bestimmt. Die Mitarbeitenden in der direkten E-Motoren-Produktion wurde auf Basis einer internen Referenzkostenkalkulation, die den Produktionsprozess abbildet, mit 170 Angestellten festgelegt. Da gesamt 275 Mitarbeitende benötigt werden, sind 105 Mitarbeitende somit indirekt an der Fertigung beteiligt. Die indirekt beteiligten Mitarbeitenden sind beispielsweise in der Produktionssteuerung, der Qualitätskontrolle, der Logistik oder der Verwaltung tätig. Der Anteil der indirekt beteiligten Mitarbeitenden basiert auf den im Rahmen der Strukturstudie BW[®] mobil 2019 verwendeten Daten der ELAB2.0-Studie Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) (Bauer, et al., 2018). Des Weiteren wurden Effizienzsteigerungen in der Produktion sowie Skaleneffekte von insgesamt 1% pro Jahr berücksichtigt.

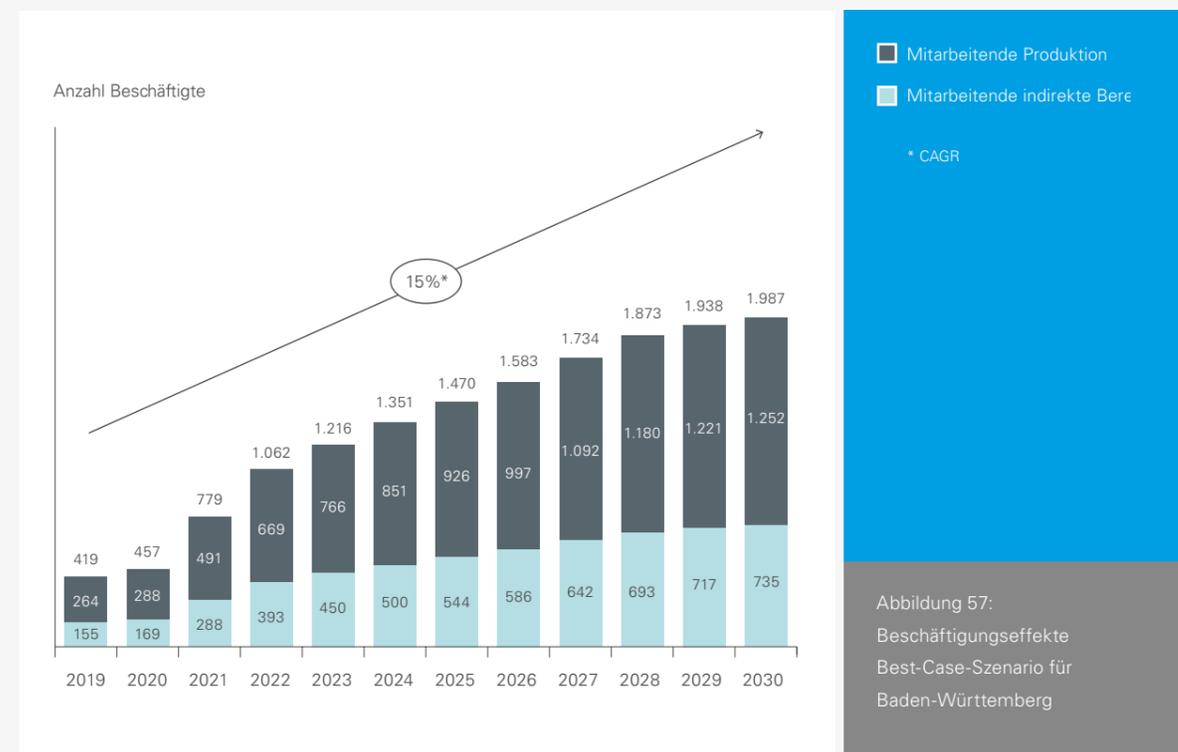


Abbildung 57:
Beschäftigungseffekte
Best-Case-Szenario für
Baden-Württemberg

Im Jahr 2019 waren den Berechnungen des Modells zufolge 419 Mitarbeitende in der Fertigung von E-Motoren in Baden-Württemberg beschäftigt, wovon 264 Beschäftigte der Produktion und 155 Beschäftigte den indirekten Bereichen zugeordnet werden können (siehe Abbildung 57). Aufgrund von dämpfenden Effekten durch die COVID-19-Pandemie wird es 2020 nur zu einer geringen Steigerung der Beschäftigtenzahlen kommen. Insgesamt wird jedoch mit einer CAGR von ca. 15% gerechnet, wodurch bis zum **Jahr 2030 nach der Modellrechnung insgesamt fast 2.000 Mitarbeitende an der Produktion von E-Motoren beteiligt sein werden**. Davon könnten ca. 1.250 Mitarbeitende direkt der Produktion und ca. 750 indirekten Bereichen zugeordnet werden.

5.

Definition einer Standardlieferkette für elektrische Antriebsmotoren in Automobilanwendungen und Implikationen für die Wertschöpfung in Baden-Württemberg

Der globale Bedarf an elektrischen Traktionsmotoren wird durch die Elektrifizierung der Mobilität, wie in Kapitel 3.2 prognostiziert, von 2020 bis 2030 auf ein kumuliertes Gesamtmarktpotenzial von ca. 22 Mrd. € anwachsen. Aufgrund des hohen Wachstumspotenzials der elektrischen Antriebstechnologien und der angekündigten Strategien der Fahrzeughersteller werden sich die aktuell etablierten Lieferketten nochmals stark verändern. In diesem Kapitel werden daher die Lieferketten der E-Motoren-Produktion mit Ausblick auf die nächsten Produktgenerationen für das Jahr 2025 hergeleitet und es wird eine Standardlieferkette definiert.

Daran anschließend wird ein Realistic-Case-Szenario für Baden-Württemberg abgeleitet. Es basiert auf Basis der Bewertung des Standorts Deutschland bzw. Baden-Württemberg innerhalb des globalen Produktionsnetzwerks sowie unter Betrachtung der Technologiekompetenz und der definierten Standardlieferkette.

- Die Analyse der Marktanteile der E-Motoren-Hersteller für das Jahr 2025 ergab, dass sowohl **OEMs als auch Tier-1-Automobilzulieferer aus Europa, Asien und Nordamerika zu den Unternehmen mit den größten prognostizierten Marktanteilen zählen**. Die marktführenden Positionen werden voraussichtlich von der Robert Bosch GmbH, der Volkswagen AG, der Renault Group, der Magna International Inc. und der Hyundai Mobis Co., Ltd. eingenommen.
- Unter Einbezug der Strukturstudie BW⁶ mobil 2019 sowie der von den Fahrzeugherstellern angekündigten vertikalen Integration ergab die Untersuchung der **weltweiten Produktionsnetzwerke**, dass insbesondere die an der E-Motoren-Produktion beteiligten **OEMs stärker regionale Lieferantenbeziehungen aufbauen** und regional für den jeweiligen Markt fertigen. Bei den **Tier-1-Zulieferern werden beispielsweise durch die Gründung von Joint Ventures stärkere internationale Verflechtungen** aufgebaut und die (Sub-)Komponenten stärker aus weltweiter Produktion zugekauft.
- Für die Mehrzahl der **OEMs konnte ein Trend zur teilweisen Inhouseproduktion** aufgezeigt werden. Dieser wurde auch als zukünftiges **Standardlieferketten-Szenario** definiert. Hierbei werden vor allem die strategisch wichtigsten Komponenten sowie die Montage für die volumenseitig großen Plattformen bei OEMs Inhouse abgedeckt. Die aus strategischer Sicht weniger wichtigen Subkomponenten werden teilweise zugekauft. Tier-1-Unternehmen

produzieren weiterhin E-Motoren für OEMs ohne Inhousefertigung und für die nicht im Rahmen der Eigenproduktion abgedeckten Anwendungsfelder.

- Unter Berücksichtigung der weltweiten Lieferketten von (Sub-)Komponenten und des Anteils, zu dem diese im Rahmen der E-Motoren-Produktion in Baden-Württemberg auf dem internationalen Markt zugekauft werden, wurde ein **Realistic-Case-Szenario** für das Wertschöpfungspotenzial des Landes berechnet. Dieses beträgt aktuell **ca. 16 Mio. € und wird sich voraussichtlich bis zum Jahr 2030 auf über 80 Mio. € steigern**.

5.1. Standardlieferkette und Produktionsnetzwerk

In der Produktion von elektrischen Traktionsmotoren etablieren sich mit steigendem Produktionsvolumen aktuell globale Netzwerke aus Herstellern und Subkomponentenlieferanten für Großserienproduktionen. Diese Netzwerke und Lieferketten werden im Folgenden beschrieben und diskutiert. Zunächst wird eine Prognose der Marktanteile von E-Motoren-Herstellern für das Jahr 2025 erstellt. Darauf aufbauend werden die Verteilungen der Marktanteile hinsichtlich OEMs und Tier-1-Lieferanten untersucht. Anschließend findet eine Analyse der Lieferantenbeziehungen zwischen den globalen E-Motoren-Herstellern und den Komponentenlieferanten statt. Unter Betrachtung dieser Lieferantenbeziehungen werden dann verschiedene Szenarien für Standardlieferketten herausgearbeitet

und in Abhängigkeit von der Integrationstiefe der E-Motoren-Produktion bei den Fahrzeugherstellern diskutiert. Schließlich wird unter Betrachtung der globalen Lieferketten und Produktionsnetzwerke eine Bewertung der Wertschöpfungstiefe des Standorts Baden-Württemberg durchgeführt.

5.1.1. Weltweite Produktionsnetzwerke von Traktionsmotoren und deren Subkomponenten im Überblick

Zu Beginn werden neue sowie technologisch und volumenseitig marktrelevante globale Hersteller von elektrischen Traktionsmotoren mit Hinblick auf deren Marktanteile betrachtet. Es wird eine Prognose der Marktanteile der jeweiligen Hersteller auf Basis der öffentlich bekanntgemachten Kunden und Lieferantenbeziehungen mit Ausblick auf das Jahr 2025 durchgeführt. Die Prognose basiert unter anderem auf der Entwicklung des Bedarfs an E-Motoren pro Fahrzeughersteller, der Entwicklung der Antriebsarten sowie den in Kapitel 4 diskutierten Strategien der OEMs und Tier-1-Lieferanten (Abbildung 58). Ebenso sind bekannte Lieferantenbeziehungen und Ankündigungen zu Unternehmensausrichtungen mit in die Prognose eingeflossen. Beispielhaft ist hier die Serienproduktion von E-Motoren der Volkswagen AG, der Toyota Motor Corporation und der BYD Company Limited zu nennen. Das gesamte Marktvolumen für E-Motoren wird dabei jeweils dem Hersteller des E-Motors zugerechnet und nicht weiter auf die Wertschöpfungskette heruntergebrochen. Die Darstellung der relativen Marktanteile ist mittels einer ABC-Analyse in drei Segmenten zusammengefasst. Alle führenden Hersteller mit kumulierten Marktanteilen von 60% stellen dabei die A-Hersteller dar. Die B-Hersteller umfassen den kumulierten Marktanteil von 30% und die C-Hersteller sowie neue Marktteilnehmer mit noch geringen Produktionsvolumen im Jahr 2025 bilden ca. 10% des prognostizierten weltweiten Stückzahlvolumens ab.

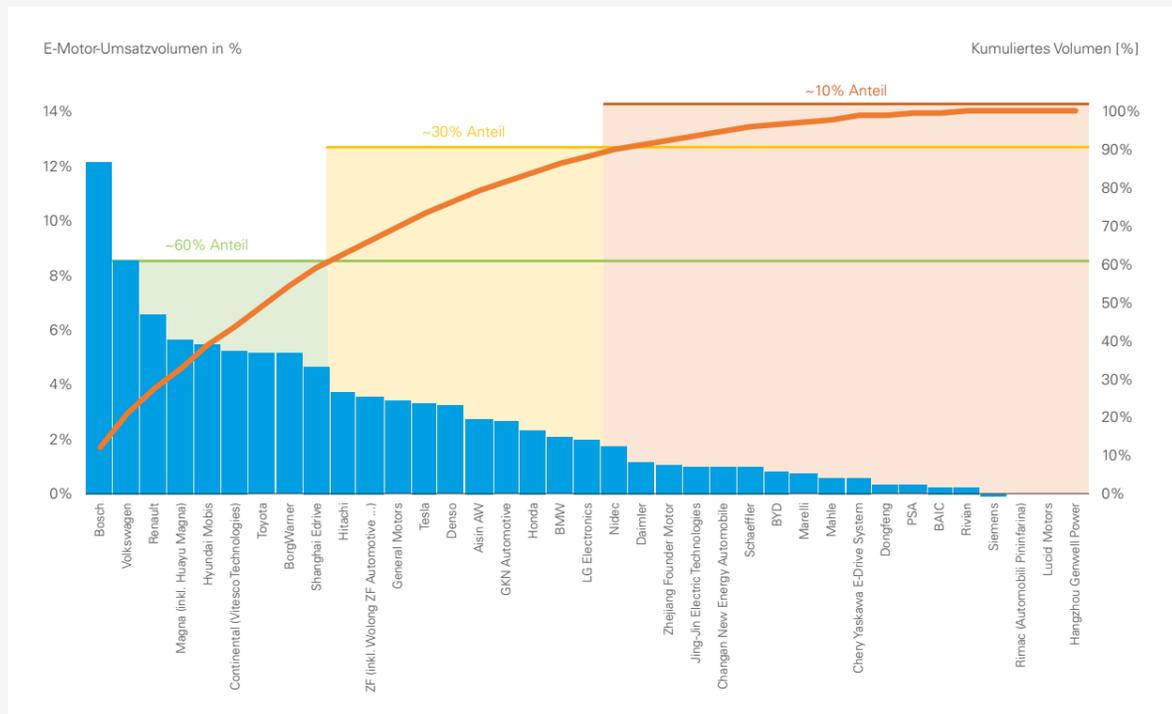


Abbildung 58: Prognose der Marktanteile der E-Motoren-Hersteller für das Jahr 2025

Quelle: Eigene Darstellung

Hersteller-A-Segment – 60 % Marktanteil

Die Analyse ergibt, dass ein Großteil des Marktpotenzials für elektrische Traktionsmotoren im Jahr 2025 (~60%) durch neun Hauptakteure abgedeckt wird. Dazu zählen Produzenten aus dem europäischen (Robert Bosch GmbH, Volkswagen AG, Renault AG, Continental AG), dem asiatischen (Shanghai Edrive Co., Ltd., Hyundai Mobis, Toyota Motor Corporation) und dem nordamerikanischen (Magna International Inc., BorgWarner Inc.) Raum. Die größten prognostizierten Marktanteile werden potenziell durch die Robert Bosch GmbH, die Volkswagen AG und die Renault AG von europäischen Unternehmen und deren Joint Ventures erwirtschaftet. Dies ist insbesondere auf die ausgeprägte europäische Automobilwirtschaft und die staatlich getriebenen Elektrifizierungsstrategien zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass sowohl Fahrzeughersteller als auch Tier-1-Zulieferer unter den Unternehmen mit den größten Marktanteilen sein werden. Dies basiert auf der Teilung des bislang von Tier-1-Unternehmen dominierten E-Motoren-Marktes bis 2025 und ist auf die in Kapitel 4 diskutierten Unternehmensstrategien zurückzuführen.

Hersteller-B-Segment – 30 % Marktanteil

In diesem Segment mit kumulierten Marktanteilen von ca. 30% lässt sich wie im A-Segment eine vergleichbare Verteilung zwischen europäischen, asiatischen und nordamerikanischen Unternehmen feststellen. Die zehn hier aufgeführten E-Motoren-Produzenten werden jeweils voraussichtlich zwischen 2% und 4% Marktanteil am weltweiten Marktpotenzial erwirtschaften. Dabei sind der japanische Mischkonzern Hitachi, der deutsche Tier-1-Automobilzulieferer ZF Friedrichshafen AG und der US-amerikanische OEM General Motors als wichtigste Unternehmen in diesem Segment zu nennen.

Hersteller-C-Segment – 10 % Marktanteil

Die im C-Segment aufgeführten Unternehmen mit einem kumulierten Marktanteil von unter 10% werden jeweils weniger als 2% Marktanteil am weltweiten Marktpotenzial erwirtschaften. Als deutsche Unternehmen sind beispielsweise die Daimler AG, die Schaeffler Gruppe, die Mahle GmbH und die Siemens AG zu nennen. Zu diesem Segment gehö-

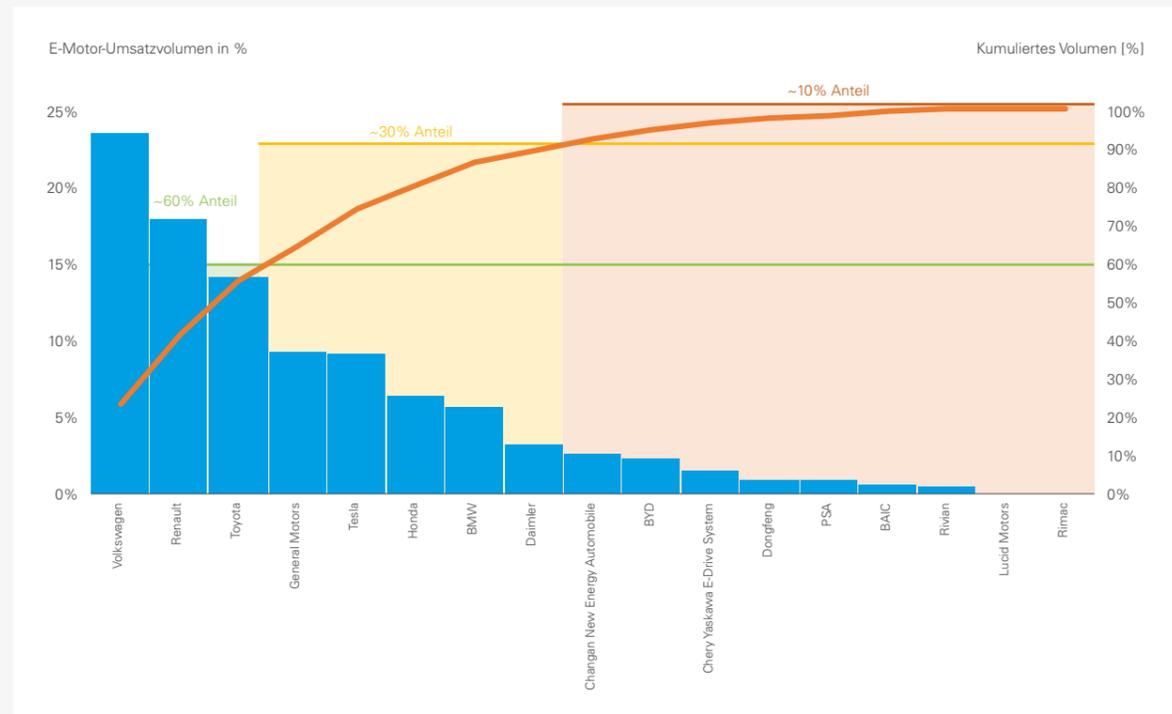


Abbildung 59: Prognose der Marktanteile der an der Produktion von E-Motoren beteiligten OEMs für das Jahr 2025

Quelle: Eigene Darstellung

ren sowohl Tier-1-Zulieferer als auch Fahrzeughersteller mit weniger ausgeprägten Elektrifizierungsstrategien bzw. geringeren Absatzzahlen.

Neben einer gesamtheitlichen Prognose der Marktanteile der führenden globalen E-Motoren-Hersteller im automobilen Antriebsbereich für das Jahr 2025 wurden ebenso die Marktanteile der OEMs und der Tier-1-Unternehmen getrennt voneinander betrachtet und in Analogie mittels einer ABC-Analyse dargestellt.

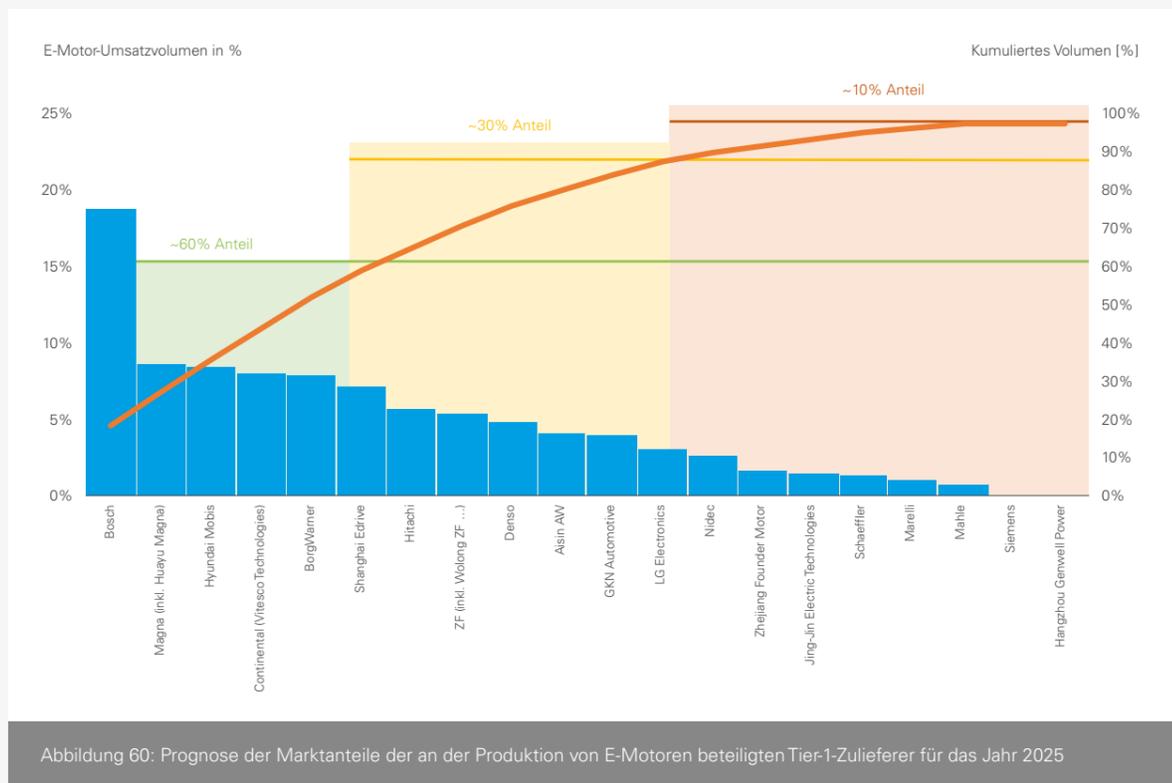
OEM-A-Segment – 60 % Marktanteil

Bei der reinen Betrachtung der OEMs werden die Volkswagen AG gefolgt von der Renault AG und der Toyota Motor Corporation voraussichtlich die größten Umsätze bei der Produktion elektrischer Traktionsmotoren erwirtschaften. Damit bilden sie zusammen einen kumulierten Marktanteil von knapp unter 60% des Marktpotenzials ab (siehe Abbildung 59). Diese Unternehmen verfolgen eine ehrgeizige Strategie zur Integration der E-Motoren-Produktion samt

Inhousemontage von Rotor, Stator und Gehäuse. Auch sind sie bereits heute an der E-Motoren-Produktion beteiligt und gehören global zu den OEMs mit den größten prognostizierten Absatzzahlen von xEV. Beispielfhaft können an dieser Stelle der VW ID.3 und der Renault ZOE als Modelle mit einem inhouse gefertigten Motor genannt werden.

OEM-B-Segment – 30 % Marktanteil

In diesem Segment mit einem kumulierten Marktanteil von 30% sind fünf OEMs mit einem Marktanteil zwischen 3% und 8% abgebildet. Hierzu zählen General Motors, Tesla, Honda, die BMW AG und die Daimler AG. Diese Unternehmen werden entweder nur teilweise ihre Motoren inhouse fertigen, wie General Motors und Honda, oder verfügen über geringere Absatzzahlen, wie Tesla. Dies führt zu einem geringen Marktvolumen im Vergleich zu Unternehmen wie der Toyota Motor Corporation, der Renault AG oder der Volkswagen AG.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 60: Prognose der Marktanteile der an der Produktion von E-Motoren beteiligten Tier-1-Zulieferer für das Jahr 2025

OEM-C-Segment – 10 % Marktanteil

OEMs mit einem Marktanteil kleiner als 3% vom weltweiten Marktpotenzial gehören zum dritten Segment und erwirtschaften kumuliert einen Marktanteil von ca. 10%. In dieser Kategorie finden sich vor allem chinesische OEMs wie BYD, Dongfeng oder BAIC.

Neben den Marktanteilen der OEMs wurden ebenso die prognostizierten Marktanteile der Tier-1-Zulieferer gesondert analysiert (siehe Abbildung 60).

Zulieferer-A-Segment – 60 % Marktanteil

Die Robert Bosch GmbH inklusive ihres Joint Ventures UAES, das gemeinsam mit dem chinesischen Konzern CNEMS gegründet wurde, wird sich mit einem Marktanteil von fast 20% voraussichtlich als führender Tier-1-Hersteller im Bereich E-Motoren am Markt etablieren können. Diese Einschätzung spiegelt sich auch in den von der Robert Bosch GmbH prognostizierten Marktanteilen der E-Motoren-Hersteller wider (Robert Bosch GmbH, 2019). Darauf folgen der kanadische Zulieferer Magna International Inc. (9% inkl. des Joint Ventures Huayu Magna), der japanische Zulieferer Hyundai Mobis Co., Ltd. (8%), der deutsche Zulieferer Continental AG (8%) und der US-amerikanische Automobilzulieferer BorgWarner Inc. (8%). Diese machen zusammen einen kumulierten Marktanteil von fast 60% des Marktanteils an elektrischen Traktionsmotoren für die Anwendung im PKW bei der Betrachtung der Zulieferer aus. Der Hersteller Hyundai Mobis Co., Ltd. wird sich voraussichtlich als der führende asiatische E-Motoren-Hersteller etablieren und beliefert aktuell die Partner Kia und Hyundai

im Konzernverbund (Industrial Media, LLC., 2007), (electrive.net, 2019). Das kanadische Unternehmen Magna Inc. wird im nordamerikanischen Markt voraussichtlich eine führende Position als Zulieferer von E-Motoren einnehmen. Allerdings hat die Magna Inc. auch mit dem chinesischen Automobilkonzern SAIC ein Joint Venture gegründet, um ihre Position am chinesischen Markt zu stärken (Elektroauto-News.net, 2017).

Zulieferer-B-Segment – 30 % Marktanteil

Zum Marktsegment mit einem kumulierten Volumen von 30% gehören Unternehmen wie Shanghai Edrive Co., Ltd., Hitachi Ltd. Corporation oder die Denso Corporation, welche als Systemlieferanten vor allem den asiatischen Markt beliefern. Die Marktanteile der Unternehmen in diesem Segment variieren dabei zwischen 4% und 8%. Auch der baden-württembergische Automobilzulieferer ZF Friedrichshafen AG ist Teil dieses Segments. Wie in Kapitel 4.2. diskutiert, wird dieser seine Kompetenzen im Bereich E-Motoren-Fertigung stetig erweitern und hat neue Produktionsstandorte in Serbien und China angekündigt.

Zulieferer-C-Segment – 10 % Marktanteil

In diesem Marktsegment mit einem kumulierten Volumen von 10% sind verschiedene chinesische und japanische Unternehmen, wie die Nidec Corporation und die Jing-Jin Electric Technologies Co. Ltd., und die deutschen Automobilzulieferer Schaeffler Gruppe und Mahle GmbH mit erwarteten Marktanteilen kleiner 4% einzuordnen.

In Abbildung 61 werden die Lieferantenbeziehungen zwischen den OEMs, den E-Motoren-Herstellern und den Subkomponentenfertigern analysiert. Für diesen Vergleich wurden weltweit elf repräsentative Unternehmen ausgewählt und Untersuchungen zu deren Kundenstrukturen und Lieferketten durchgeführt. Zu den ausgewählten Unternehmen zählen die Robert Bosch GmbH, die ZF Friedrichshafen AG, die Volkswagen AG, der chinesische E-Motoren-Hersteller Shanghai Edrive Co., Ltd., das chinesische Unternehmen UAES Co., Ltd., an dem die Robert Bosch GmbH beteiligt ist, der südkoreanische Automobilhersteller Hyundai Mobis Co., Ltd., die Allianz Renault-Nissan-Mitsubishi, das Joint Venture Huayu Magna Electronics, die US-amerikanischen Automobilkonzerne Tesla Inc. und General Motors Corporation sowie der US-amerikanische Tier-1-Zulieferer BorgWarner Inc. Diese elf Hersteller stel-

len repräsentative E-Motoren-Hersteller dar und dienen zur Erläuterung von Lieferketten für den europäischen, asiatischen und nordamerikanischen Markt. In Tabelle 3 und Abbildung 61 sind die Lieferbeziehungen zwischen den genannten E-Motoren-Fertigern, Zulieferern und Kunden dargestellt.

Der OEM Volkswagen AG und das Tier-1-Unternehmen Robert Bosch GmbH beziehen jeweils Rotor, Stator und Gehäuse teilweise aus Deutschland. Dabei werden sie von Unternehmen wie der Voith Automotive GmbH, der Handtmann Gruppe und der Kienle + Spiess Gruppe sowie von ihren mehrheitlich chinesischen Joint Ventures beziehungsweise deren Sublieferanten beliefert. Sie weisen somit zum Teil sehr regional geprägte Lieferketten auf (Voith Automotive GmbH, 2017), (Mintenbeck, 2018). Dabei wird angenommen, dass eine starke regionale, in diesem Falle europäische Lieferstruktur, wie in der Strukturstudie BMW e-mobil 2019 (e-mobil BMW GmbH, 2019) für den verbrennungsmotorbasierten Antriebsstrang beschrieben, dominiert. Die ZF Friedrichshafen AG erhält teilweise Komponenten zur E-Motoren-Fertigung, wie beispielsweise das Gehäuse, unter anderem von der Voith Automotive GmbH aus Deutschland. Es werden auch Komponenten aus Serbien und China bezogen. Dort werden diese teilweise von ZF, aber auch von externen Zulieferern gefertigt (Franken, 2013). Der Kundenstamm der deutschen E-Motoren-Produzenten befindet sich vor allem im europäischen Raum mit Automobilherstellern wie der Daimler AG, FCA, PSA und der BMW AG.

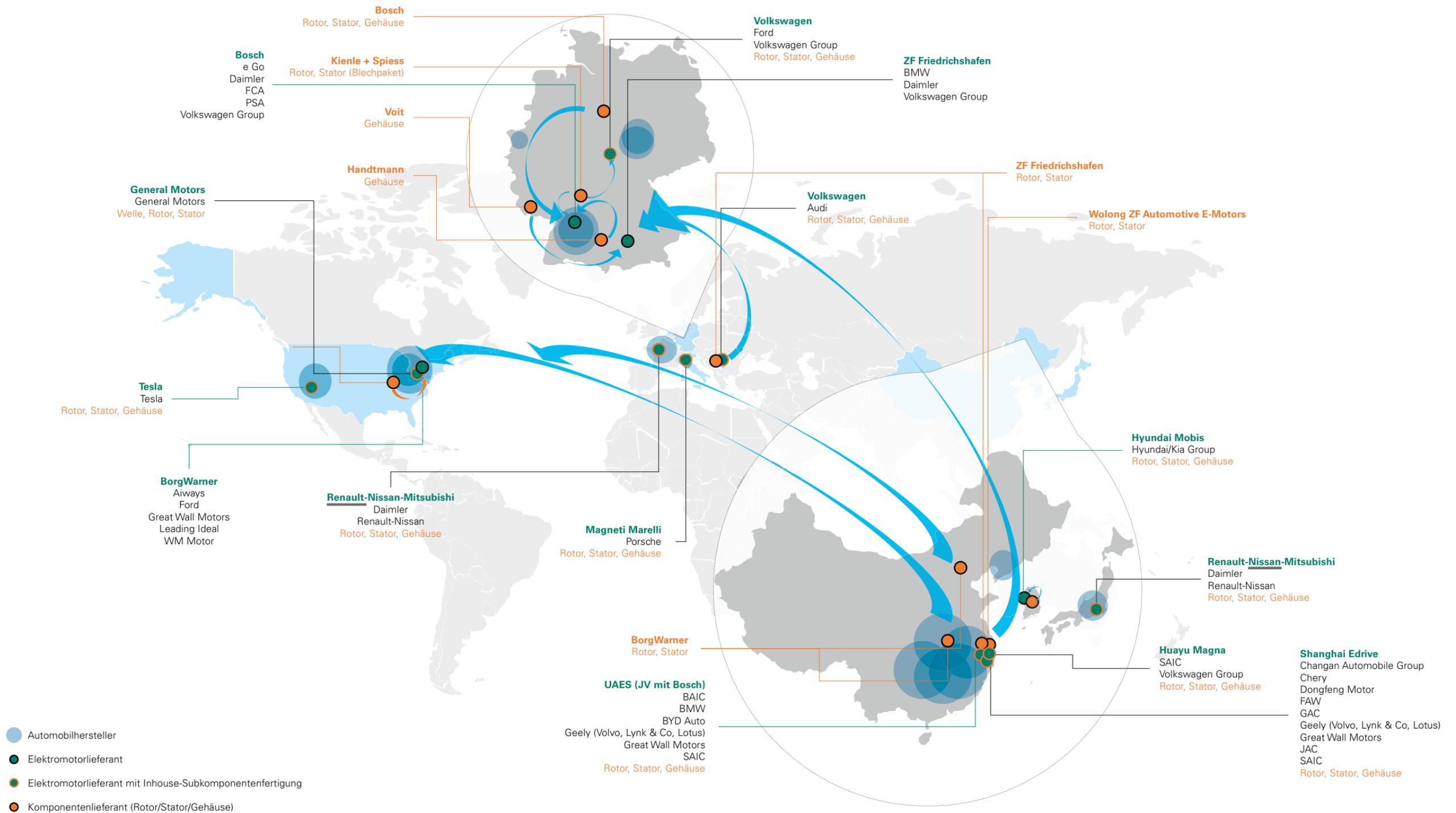


Abbildung 61: Repräsentative Lieferketten zwischen OEMs, Tier-1-Zulieferern und Komponentenh Herstellern

Quelle: Eigene Darstellung

Schlüssel-lieferanten Traktionsmotor xEV	Kunden Automobilhersteller	Rotorkomponenten – Herstellerregion (Auszug auf Basis Hauptwerk)	Statorkomponenten – Herstellerregion (Auszug auf Basis Hauptwerk)	Gehäuse – Herstellerregion (Auszug auf Basis Hauptwerk)
BorgWarner	Aiways, Ford, Great Wall Motors, Leading Ideal, WM Motor	China: Wuhan (Hubei), Beijing	China: Wuhan (Hubei), Beijing	China: Wuhan (Hubei), Beijing
Bosch (ohne UAES)	e Go, Daimler, FCA PSA, Volkswagen Group	Deutschland: Hildesheim Deutschland: Sachsenheim	Deutschland: Hildesheim Deutschland: Sachsenheim	Deutschland
General Motors	General Motors	USA: Pontiac, Bay City (Michigan)	USA: Pontiac (Michigan)	USA: Bedford (Indiana)
Huayu Magna Electric Drive System Co., Ltd. (Magna Joint Venture)	SAIC, Volkswagen Group	China: Shanghai	China: Shanghai	China: Shanghai
Hyundai Mobis	Hyundai/Kia Group	Korea: Chungju	Korea: Chungju	Korea: Chungju
Renault-Nissan-Mitsubishi	Daimler, Renault/Nissan	Japan: Yokohama	Japan: Yokohama	Japan: Yokohama
Shanghai Edrive	Changan Automobile Group, Chery, Dongfeng Motor, FAW, GAC, Geely/Volvo, Great Wall Motors, JAC, SAIC	China: Shanghai	China: Shanghai	China: Shanghai
Tesla	Tesla	USA: Sparks, Nevada	USA: Sparks, Nevada	USA: Sparks, Nevada
UAES (Bosch Joint Venture)	BAIC, BMW, BYD Auto, Geely/Volvo, Great Wall Motors, SAIC	China: Taicang	China: Taicang	China: Taicang
Volkswagen	Ford, Volkswagen Group	Deutschland: Kassel, Salzgitter Deutschland: Sachsenheim Porsche Taycan: Italien Audi: Ungarn	Deutschland: Kassel, Salzgitter Deutschland: Sachsenheim Porsche Taycan: Italien Audi: Ungarn	Deutschland: Kassel, Salzgitter, Biberach, St. Ingbert Audi: Ungarn
ZF Friedrichshafen	BMW, Daimler, Volkswagen Group	Serbien: Pancevo China: Hangzhou, Shangyu (Zhejiang)	Serbien: Pancevo China: Hangzhou, Shangyu (Zhejiang)	Deutschland: St. Ingbert China: Hangzhou, Shangyu (Zhejiang)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 3: Übersicht zu repräsentativen Lieferketten zwischen OEMs, Tier-1-Zulieferern und Komponentenherstellern auf Basis öffentlich zugänglicher Quellen

Der US-amerikanische OEM Tesla Inc. fertigt den gesamten E-Motor inhouse in seinem Hauptwerk in Sparks, Nevada. Dies ist repräsentativ für die Unternehmensausrichtung Teslas mit einer möglichst starken vertikalen Upstream-Integration, also einer hohen Wertschöpfungstiefe im Konzern. Ein vergleichbarer Trend wird ebenso für General Motors beobachtet. Die Fertigung des E-Motors und der Komponenten findet ausschließlich in den USA statt und es sind keine externen Zuliefererbeziehungen bekannt (General Motors, 2011). Der Tier-1-Automobilzulieferer BorgWarner Inc. besitzt neben Produktionskapazitäten in den USA auch Kapazitäten zur Fertigung von Welle und Rotor in China (BorgWarner Inc., 2020). Zu den Kunden der BorgWarner Inc. gehören vor allem chinesische OEMs wie Great Wall Motors, Aiways und WM Motors, aber auch die Ford Motor Company in den USA.

Für den asiatischen Raum werden die Unternehmen Hyundai Mobis, Renault-Nissan-Mitsubishi, Huayu Magna, Shanghai Edrive und UAES betrachtet. In der Allianz Renault-Nissan-Mitsubishi werden die E-Motoren der Fahrzeuge von Nissan samt Rotor, Stator und Gehäuse in Japan inhouse gefertigt (Nissan Motor Co., Ltd., 2020). Renault hingegen assembliert seine E-Motoren im französischen Cléon (Laurent, 2019). Auch der koreanische Automobilzulieferer Hyundai Mobis fertigt Komponenten und bedient mit Hyundai und Kia hauptsächlich den Mutterkonzern. Ein lokales Netzwerk aus Kunden und Zulieferern besteht auch für die chinesischen Automobilzulieferer Huayu Magna, Shanghai Edrive und UAES. Die Fertigung des Motors und der Komponenten findet in China statt und auch die Kunden sind zumeist chinesische OEMs. Beispielhaft können hier die Lieferbeziehungen zwischen den Herstellern Huayu Magna und SAIC und die Belieferung von Dongfeng, MW Motors und JAC durch Shanghai Edrive genannt werden. Teilweise werden von diesen Zulieferern jedoch auch europäische OEMs wie die BMW AG und die Volkswagen AG beliefert. Mit Blick auf die chinesischen Lieferantennetzwerke ist noch die gesonderte Position bei der Magnetfertigung für den Rotor des PSM zu beachten. China besitzt die weltweit größten Vorkommen an seltenen Erden, die unerlässlich für die Fertigung eines PSM sind, und erhält dadurch eine starke Marktposition.

Die Analyse hat ergeben, dass insbesondere die an der E-Motoren-Produktion beteiligten OEMs stärker regionale Lieferantenbeziehungen aufgebaut haben bzw. regional fertigen. Als Beispiel können hier der Volkswagen-Konzern und

im Speziellen VW als Marke für den europäischen Markt mit der hauptsächlichlichen Fertigung von Komponenten in Deutschland angeführt werden. Ein Beispiel dafür ist das Gehäuse des Modells ID3. Ebenso können General Motors für den nordamerikanischen Markt mit der Fertigung in den USA und Renault-Nissan-Mitsubishi mit der lokalen Fertigung in Japan und Frankreich genannt werden.

Bei den Tier-1-Zulieferern zeigt sich, dass stärkere internationale Verflechtungen bestehen. Die Robert Bosch GmbH hat beispielsweise ein Joint Venture mit UAES und der kanadische Zulieferer Magna International Inc. ein Joint Venture mit SAIC gegründet. Diese Joint Ventures wurden mit dem Ziel gestartet, den chinesischen Markt stärker bedienen zu können – aber auch, um eine kostengünstige Produktion von (Sub-)Komponenten zu ermöglichen.

Des Weiteren ist bei den Tier-1-Zulieferern die Fertigung weniger stark von einem lokalen Netzwerk geprägt. So führt beispielsweise die ZF Friedrichshafen AG die Fertigung von Rotor und Stator in China bzw. Serbien durch und produziert das Gehäuse aufgrund des erforderlichen technologischen Know-hows teilweise in Deutschland. Auch BorgWarner besitzt internationale Produktionskapazität mit einer Komponentenproduktionen in China.

5.1.2. Definition eines Standardlieferketten-Szenarios für elektrische Antriebsmotoren

Für die Definition eines Standardlieferketten-Szenarios für elektrische Traktionsmotoren werden zunächst verschiedene Integrationsstufen bei der Fertigung von E-Motoren seitens der Fahrzeughersteller betrachtet. Generell sind hierbei drei Strategien möglich (siehe Abbildung 62):

- eine Inhouseproduktion aller E-Motoren-Komponenten
- eine teilweise Inhouseproduktion der strategisch wichtigen Komponenten
- der Zukauf des E-Motors als Systemkomponente von Zulieferern

Diese Strategien bergen Vor- und Nachteile und damit Potenziale und Risiken für die OEMs. Im Folgenden werden diese diskutiert.

Die vollständige Inhouseproduktion aller technischen sowie kostentechnisch strategisch wichtigen E-Motoren-Komponenten wird zum Beispiel von BYD Ltd. und von Tesla Inc. verfolgt. Sowohl Tesla als auch BYD zeichnen sich dadurch aus, dass diese Unternehmen auf eine hohe Fertigungstiefe in ihrer Produktion setzen und so beispielsweise von der Produktion der Batterie über die Elektronik und den E-Motor bis hin zur Entwicklung der Software beteiligt sind (Field, 2019), (BYD, 2020).

Vor- und Nachteile einer Inhouseproduktion

Bei der Produktion des E-Motors bietet diese Strategie verschiedene Vorteile. Zum einen führt die Inhouseproduktion aller wichtigen Komponenten des E-Motors zur größten Marktunabhängigkeit in Bezug auf Preisentwicklungen und Versorgungssicherheit. Des Weiteren sind Kostenvorteile möglich und eine Eigenentwicklung/Fertigung des Motors kann zu Technologievorteilen führen. Diese technischen Entwicklungen sind somit auch nicht direkt für weitere Marktteilnehmer zugänglich. Fortführend ist eine hohe Flexibilität bei der Entwicklung des Motors vorhanden, wodurch dieser besser an die Anforderungen der jeweiligen Fahrzeuge angepasst werden kann.

Als Risiken einer starken vertikalen Upstream-Integration sind sowohl hohe finanzielle Investitionen in Forschung und Entwicklung als auch solche in entsprechende Produktionslinien zu nennen. Ebenso ist eine reduzierte Flexibilität mit Hinblick auf Produktionsvolumen anzuführen. Bei OEMs, die die Strategie einer Inhouseproduktion verfolgen, kann jedoch teilweise auch beobachtet werden, dass der Bedarf an E-Motoren für einzelne Modelle oder Leistungsklassen durch einen Zukauf von E-Motoren gedeckt wird.

Vor- und Nachteile einer teilweisen Inhouseproduktion

Bei einer teilweisen Inhouseproduktion werden die kostenin-

teusiven Produktionsschritte wie die Montage des Rotors sowie des Stators und die Endmontage des Motors von den OEMs durchgeführt und Low-Cost-Komponenten auf dem weltweiten Markt zugekauft. Unternehmen, die die Strategie der teilweisen Inhousefertigung verfolgen, produzieren zu meist E-Motoren für die größten Plattformen selbst und kaufen weiterhin E-Motoren für kleinere Anwendungsfelder und Sondervarianten zu. Dabei finden die Entwicklung und die Spezifikation der E-Motoren zum größten Teil inhouse statt.

Diese Strategie bietet die Vorteile niedrigerer Investitionen in der Produktion im Vergleich zur vollständigen Inhouseproduktion. Jedoch werden die für die Auslegung und das Design des Motors entscheidenden Komponenten weiterhin durch den OEM gefertigt. Dadurch kann ein hohes Maß an Flexibilität zur Entwicklung und Auslegung des Antriebsstrangs erhalten werden. Durch den Einkauf verschiedener Subkomponenten besteht zudem ein geringes Risiko, sich in die Abhängigkeit von Zulieferern zu begeben. Ein Großteil der OEMs wie beispielsweise die Renault AG, die Daimler AG, die Volkswagen AG, die BMW AG und die General Motors Corporation hat angekündigt, diese Strategie zu verfolgen.

Vor- und Nachteile des kompletten Zukaufs

Im Falle eines Zukaufs des gesamten E-Motors über alle Plattformen von Tier-1-Unternehmen fallen die niedrigsten Investitionen bei der Elektrifizierung des Antriebsstranges an

und es ist ein schneller Markteintritt möglich. Diese Strategie verfolgen beispielsweise die Ford Motor Corporation und der FCA-Konzern. Sie erfordert eine enge Zusammenarbeit mit den entsprechenden Lieferanten, um Spezifikationen, Designänderungen und technologische Neuerungen entsprechend implementieren zu können. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2030 nur noch wenige Automobilhersteller ihren kompletten Bedarf an E-Motoren mittels Zukäufen decken werden (vgl. Kapitel 4.2).

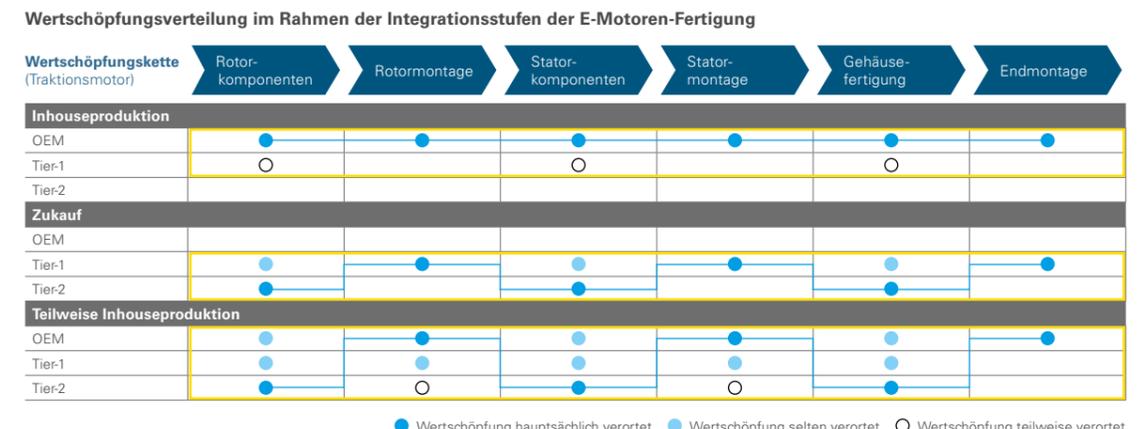
Der Nachteil dieser Strategie ist, dass große Abhängigkeiten von Tier-1-Zulieferern bestehen. Zudem können keine technologischen Fortschritte durch die OEMs ohne Tier-1-Lieferanten erreicht werden und es besteht eine geringere Flexibilität bei der Auslegung der E-Motoren. Auf der anderen Seite lassen sich mit der konsolidierten Fertigung von E-Motoren mehrerer Hersteller infolge der erhöhten Stückzahlen höhere Skaleneffekte realisieren.

Bei den diskutierten Strategien zur E-Motoren-Fertigung durch die OEMs sind verschiedene Wertschöpfungsverteilungen zwischen OEM, Tier 1 und Tier-2 je nach Integrations-tiefe der Fertigung möglich (siehe Abbildung 63). Nachfolgend werden die Anteile der OEMs entlang der Wertschöpfungskette je nach Fertigungsstrategie diskutiert und auf die in Kapitel 4 bereits erörterten sechs integrierten Produktionsschritte (Fertigung der Rotorkomponenten, Rotormontage, Fertigung der Stator-komponenten, Stator-montage, Gehäuse-fertigung und die Endmontage) bezogen.

Integrationsstufen der E-Motoren-Fertigung bei Fahrzeugherstellern		
<p>Inhouseproduktion Alle wichtigen E-Motor-Komponenten werden inhouse spezifiziert und hergestellt.</p>	<p>Teilweise Inhouseproduktion Eigenfertigung der wichtigen Nicht-Commodity-Komponenten. Spezifikation und Entwicklung inhouse.</p>	<p>Zukauf Keine Eigenfertigung von Komponenten und Gesamtsystem. Interne Spezifikation kann variieren.</p>
<p>Beispiele</p> 	<p>Beispiele</p> 	<p>Beispiele</p> 
<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Unabhängigkeit + Technologievorteile möglich + Höchste Flexibilität zur Verbesserung des E-Motors - Höchste Investitionen erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> + Strategisch wichtige Komponenten werden inhouse gefertigt + Niedrige Investition/geringes Risiko + Flexibilität zur Verbesserung des Antriebsstrangs - Teilweise Abhängigkeit von Lieferanten 	<ul style="list-style-type: none"> + Niedrigste Investition/geringstes Risiko + Schneller Markteintritt möglich - Hohe Abhängigkeit von Lieferanten - Geringste Flexibilität zur Verbesserung des Antriebsstrangs

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 62: Mögliche Strategien bei der Fertigung von E-Motoren bei OEMs



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 63: Verteilung der Wertschöpfungen in Abhängigkeit von der Fertigungsstrategie der OEMs

Im Falle einer vollständigen Inhouseproduktion findet die Wertschöpfung des E-Motors vollständig durch den OEM statt. Dies bedeutet, dass alle zuvor diskutierten Produktionsschritte vom OEM durchgeführt werden. Es ist bei der Fertigung der Komponenten jedoch möglich, einzelne Schritte wie die Produktion von Statorkomponenten auch von Tier-1- bzw. Tier-2-Zulieferern durchführen zu lassen. Dies ist jedoch eher die Ausnahme.

Im Szenario der teilweisen Inhouseproduktion des E-Motors werden vom OEM zumeist die Montageschritte des Stators und des Rotors sowie die Endmontage übernommen. Die Produktion der Komponenten erfolgt meist teilweise durch den OEM und teilweise durch die Zulieferer. Somit sind die Zulieferer weiterhin an der Produktion beteiligt und können entsprechende Wertschöpfungsanteile adressieren. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Szenario die Standardlieferkette für E-Motoren bis zum Jahr 2030 darstellen wird, da es mit den Produktionsstrategien der meisten und auch der verkaufsstärksten OEMs zum heutigen Zeitpunkt übereinstimmt.

Bei einem vollständigen Zukauf der E-Motoren durch den OEM wird die Produktion des E-Motors beim Tier-1-Zulieferer stattfinden, der an allen Produktionsschritten beteiligt sein wird. Dazu ist es möglich, dass die Tier-2-Unternehmen die Fertigung des Rotors, des Stators und des Gehäuses sowie der Subkomponenten wie Welle und Blechpaket übernehmen.

Zur **Definition eines weltweiten Standardlieferketten-Szenarios bis zum Jahr 2030 kann festgehalten werden, dass die teilweise Inhouseproduktion die Strategie für einen Großteil der OEMs darstellen wird.** Dabei werden voraussichtlich insbesondere für die großen Fahrzeugplattformen mit den höchsten Verkaufszahlen die E-Motoren durch die OEMs gefertigt. Die Tier-1- bzw. Tier-2-Unternehmen bleiben weiterhin an der Wertschöpfung durch die Produktion von Subkomponenten beteiligt. Des Weiteren werden die Tier-1-Unternehmen E-Motoren für OEMs ohne Inhousefertigung und ebenso für Produktlösungen in Anwendungsfeldern mit geringerem Umsatzpotenzial übernehmen. Die komplette Inhouseproduktion des gesamten E-Motors inklusive (Sub-)Komponenten wird auch bis zum Jahr 2030 nur in Sonderfällen und bei OEMs mit besonders starker vertikaler Upstream-Integration stattfinden.

5.1.3. Bewertung des Standorts Deutschland bzw. Baden-Württemberg innerhalb des globalen Produktionsnetzwerks

Mit dem Ziel, eine Bewertung des Standorts Deutschland bzw. Baden-Württemberg innerhalb der globalen E-Motoren-Produktion durchzuführen, werden zunächst die für das Jahr 2025 prognostizierten Marktanteile deutscher E-Motoren-Hersteller am Weltmarkt analysiert (siehe Abbildung 64).

Die Robert Bosch GmbH, die Volkswagen AG, die Continental AG, die ZF Friedrichshafen AG, die BMW AG, die Daimler AG, die Schaeffler Gruppe, die Mahle GmbH und die Siemens AG werden im Jahr 2025 einen prognostizierten kumulierten Marktanteil von ca. 35% des weltweiten Marktpotenzials erwirtschaften. Hierbei wurden ebenso die Joint Ventures deutscher Unternehmen, wie beispielsweise UAES als Joint Venture zwischen der Robert Bosch GmbH und CNEMS sowie Wolong ZF Automotive E-Motors als Joint Venture zwischen Wolong und der ZF Friedrichshafen AG, berücksichtigt. 65% des Marktpotenzials werden folglich von E-Motoren-Herstellern mit Sitz außerhalb Deutschlands erwirtschaftet.

Sowohl Deutschland als auch Baden-Württemberg als Bundesland werden sich voraussichtlich durch das hohe Engagement von Herstellern wie der Robert Bosch GmbH, der ZF Friedrichshafen AG, der Daimler AG, der Schaeffler Gruppe und der Mahle GmbH als führende Standorte bei der globalen Produktion von E-Motoren etablieren. Diese prognostizierte Entwicklung wird sowohl auf die vorhandenen Montagekompetenzen als auch auf die ausgeprägte Forschung und Entwicklung seitens der OEMs und Tier-1-Zulieferer zurückgeführt.

Der Industriestandort Deutschland besitzt zudem aufgrund der starken Automobilindustrie sowie der Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ausgeprägte Kompetenzen im Bereich Fahrzeug- und Motorenbau. Diese Kompetenzen wurden in der Vergangenheit aufgebaut und werden auch zukünftig bei der Fertigung von E-Motoren und deren Integration in Fahrzeuge von entscheidender Bedeutung sein. Des Weiteren kann das große Netzwerk aus Anlagenherstellern und Maschinenbauern zum Erfolg des Industriestandorts Deutschland beitragen. Sie werden weiterhin eng mit den Motorenherstellern zusammenarbeiten und besitzen die Kompetenzen zur Produktion

Prognose der Marktanteile der aktuellen E-Motoren-Hersteller mit Ausblick auf das Jahr 2025

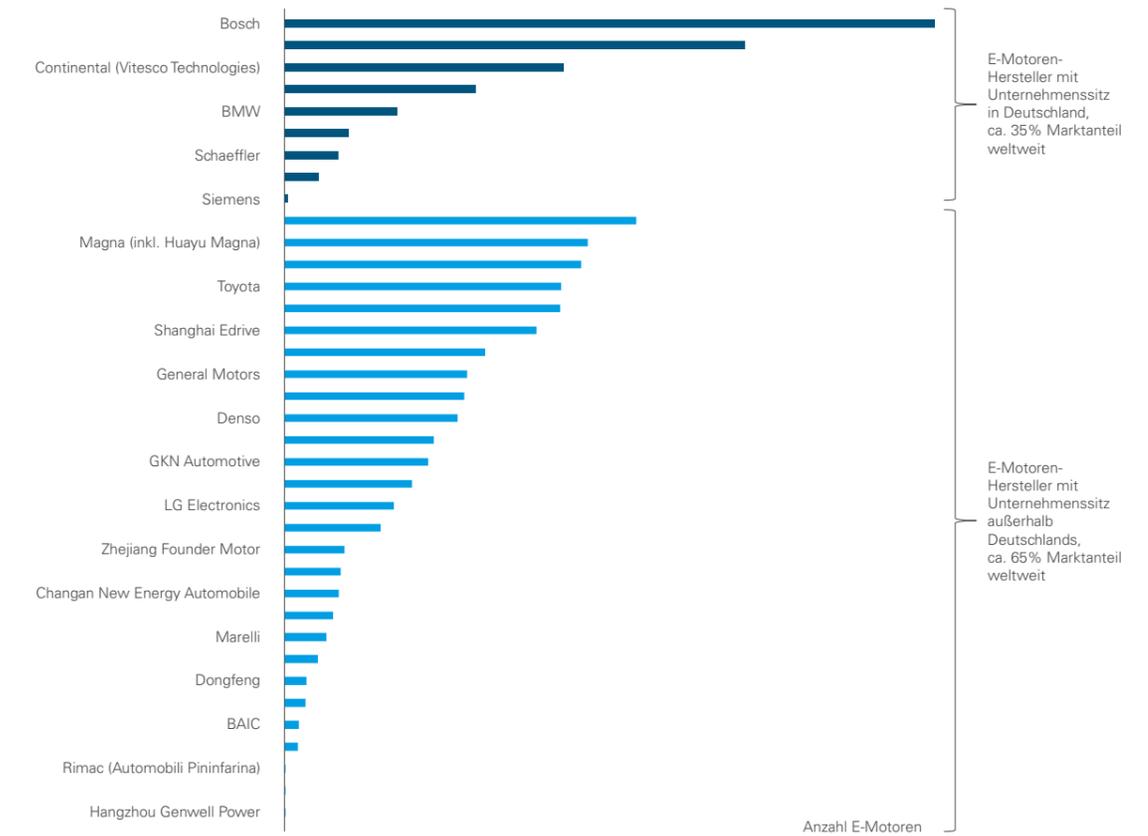


Abbildung 64: Marktanteile deutscher Unternehmen an der globalen E-Motoren-Produktion für das Jahr 2025

Quelle: Eigene Darstellung

von Komponenten, Montagemaschinen und Robotern, die die hocheffiziente Produktion von E-Motoren ermöglichen und eine Fertigung in Deutschland erst rentabel machen.

Zudem haben sich in Deutschland und Baden-Württemberg viele Netzwerkstrukturen etabliert, die zur Vernetzung und zum Wissenstransfer der unterschiedlichen Stakeholder im Bereich E-Motoren beitragen und somit einen relevanten Beitrag zum Aufbau eines wirtschaftlichen „Ökosystems“ auf regionaler und auf Landesebene leisten.

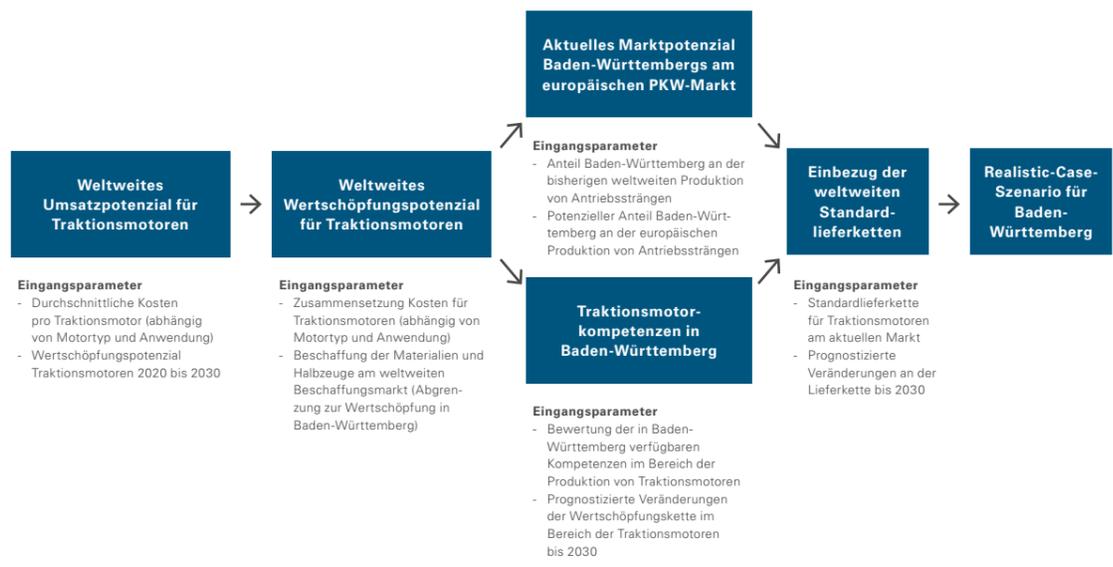
5.2. Wertschöpfungspotenziale für Baden-Württemberg

In Kapitel 4.2 wurde ein **Best-Case-Szenario** für die Abschätzung des Wertschöpfungspotenzials bis 2030 von elektrischen Traktionsmotoren in Baden-Württemberg entwickelt. Auf Basis der in Kapitel 5.1 erörterten weltweiten Lieferketten, der Ableitung des Standardlieferketten-Szenarios und der Betrachtung der Produktionsanteile der in Baden-Württemberg ansässigen Unternehmen bis zum Jahre 2030 wird folgend ein **Realistic-Case-Szenario** für die Entwicklung des Wertschöpfungspotenzials berechnet. Es wird anschließend ein Vergleich der beiden Szenarien durchgeführt.

5.2.1. Einordnung der Technologiekompetenz und der Marktposition des Standorts Baden-Württemberg

Im in Kapitel 4.2 dargestellten **Best-Case-Szenario** wurde davon ausgegangen, dass **alle Fertigungsschritte des E-Motors** im Land durchgeführt werden. Dies ist damit begründet, dass die Kompetenzen grundsätzlich in Baden-Württemberg vorhanden sind. Ausgehend von diesem Szenario wird im Folgenden ein **realistisches Szenario** zur Entwicklung der Wertschöpfung abgeleitet (siehe Abbildung 64). Hierfür werden die in Kapitel 5.1 erarbeitete Standardlieferkette sowie die Analyse der strategischen Ausrichtung der ansässigen E-Motoren-Hersteller herangezogen. Es wird dazu nachfolgend analysiert, **zu welchem Anteil die einzelnen Produktionsschritte in Baden-Württemberg durchgeführt werden** und in welchem Umfang die einzelnen **Subkomponenten** auf dem (inter-)nationalen Markt **zugekauft werden**. Durch diese Erweiterung der weltweiten Standardlieferketten ergibt sich im Realistic-Case-Szenario eine geringere Wertschöpfung im Land als im optimistischen Szenario (siehe Abbildung 65). Des Weiteren wird untersucht, wie sich die landesweite Produktion und der Zukauf von Komponenten bis zum Jahr 2030 verändern werden.

Im Rahmen der Produktion von E-Motoren in Baden-Württemberg finden die Montage des Rotors und des Stators sowie die Endmontage zu großen Teilen im Land statt und der Wertschöpfungsanteil liegt somit voraussichtlich bei annähernd 100% der Absatzmenge der baden-württembergischen Produktion. Diese Fertigungsschritte werden heute vorrangig von den Tier-1-Unternehmen durchgeführt und nicht an externe Unternehmen ausgelagert. Dadurch tragen sie vollständig zur baden-württembergischen Wertschöpfung bei. Auch für die Jahre bis 2030 wird diese Wertschöpfung voraussichtlich weiter im Land stattfinden, es wird allerdings zu einer teilweisen Verlagerung der Montageschritte von den Tier-1-Zulieferern zu den OEMs kommen (vgl. Kapitel 4.1). **Die Fertigung der Subkomponenten** hingegen, des Blechpakets und der Welle des Rotors sowie des Blechpakets des Stators und des Gehäuses **erfolgt derzeit nur teilweise in Baden-Württemberg**. Diese Subkomponenten werden von den E-Motoren-Herstellern zu großen Teilen auf dem internationalen Markt zugekauft. Im Rahmen eines Berechnungsmodells wurden auf Basis der in Kapitel 5.1 evaluierten Standardlieferkette, der untersuchten Lieferantenbeziehungen der deutschen E-Motoren-Hersteller und deren Unternehmensstrategien die in Baden-Württemberg verorteten Wertschöpfungsanteile der (Sub-)Komponentenfertigung bis 2030 errechnet.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 65: Ableitung des Realistic-Case-Szenarios zur Wertschöpfung in Baden-Württemberg

Die Produktionsschritte Blechpaket und Welle des Rotors sowie Blechpaket des Stators tragen nur zu ca. 30% zur landesweiten Wertschöpfung bei. Auch die Fertigung des Gehäuses findet nur teilweise in Baden-Württemberg statt und der Wertschöpfungsanteil beträgt 45% des Best-Case-Szenarios. In den Jahren 2025 bis 2030 wird die Produktion der Subkomponenten stärker durch die Unternehmen im Land übernommen werden. Dies ist zum einen auf die Strategie zur vertikalen Upstream-Integration seitens der E-Motoren-Hersteller wie beispielsweise der Daimler AG und der Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG zurückzuführen. Zum anderen liegt dies an der Übernahme dieser Produktionstätigkeiten im Rahmen einer Großserienproduktion durch die Tier-2- und Tier-n-Zulieferer, die infolge des wachsenden E-Motoren-Markts ihre Produktion an eine Fertigung von Subkomponenten für E-Motoren anpassen.

Zwischen den Jahren 2020 und 2030 werden sich die Produktions- und Wertschöpfungsanteile der E-Motoren-Produktion Baden-Württembergs steigern lassen: beim Blechpaket von Rotor und Stator sowie der Welle von 30% auf 45% und beim Gehäuse von 45% auf 60%.

Zusätzlich zu den bereits genannten Volumensteigerungen und den entsprechenden Skaleneffekten, die eine Produktion in Baden-Württemberg erst wirtschaftlich machen, führt auch eine mögliche zunehmende Differenzierung der Hersteller über den E-Motor zu einer gesteigerten Near-Shore-Produktion. Dies erfolgt seitens der Fahrzeughersteller, um möglichst schnell Technologieentwicklungen bei den entscheidenden Komponenten umsetzen zu können. In Kapitel 5.1 wurde dies im Rahmen der teilweisen Inhouseprodukti-

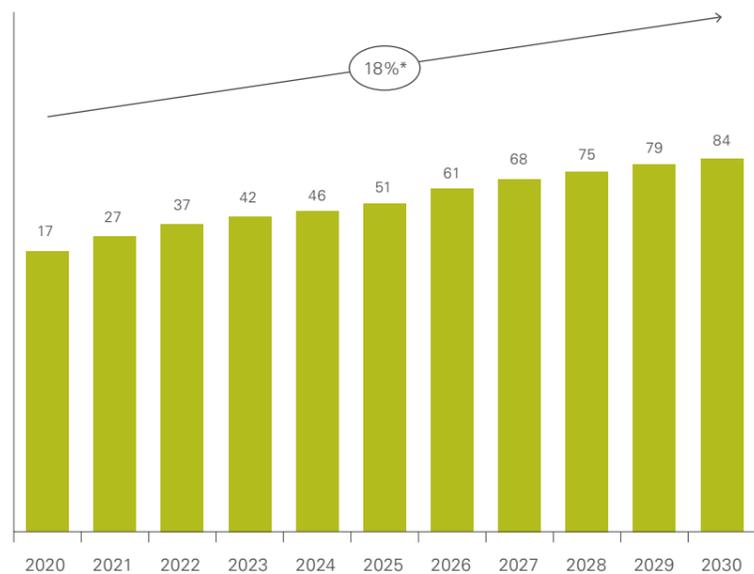
on bereits beschrieben – es lässt sich auch am Beispiel der Wertschöpfungstiefe Baden-Württembergs an der heutigen Produktion von Verbrennungsmotoren für den europäischen Markt mit einem Anteil von 14% nachvollziehen (e-mobil BW GmbH, 2019).

	Rotorblechpaket	Rotorwelle	Rotormontage	Statorblechpaket	Statormontage	Gehäuse	Endmontage
2020–2024	30%	30%	100%	30%	100%	45%	100%
2025–2030	45%	45%	100%	45%	100%	60%	100%

Abbildung 66: Produktionsanteile Baden-Württembergs auf Basis der Standardlieferkette

Quelle: Eigene Darstellung

Millionen €



■ Wertschöpfungspotenzial Traktionsmotoren Produktion Baden-Württemberg

* CAGR

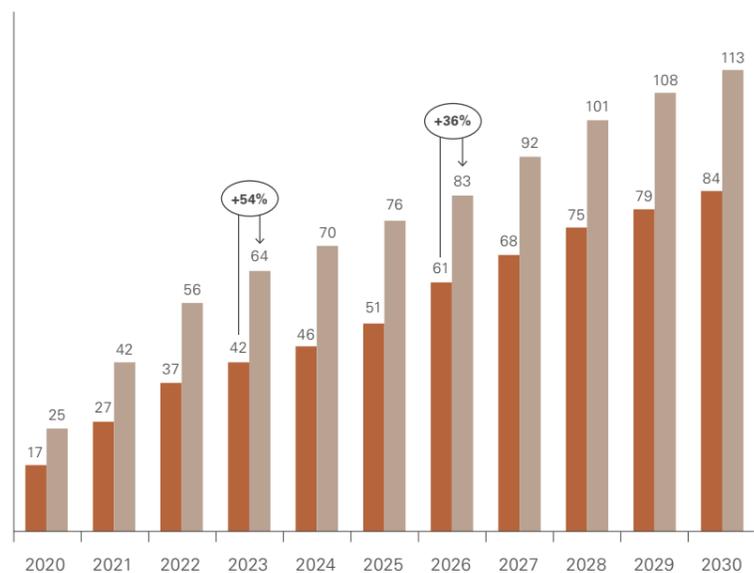
Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 67: Potenzielle Wertschöpfung Realistic-Case-Szenario Baden-Württemberg

Aufgrund der an die Realität angepassten Annahme, dass nicht alle E-Motoren-Komponenten in Baden-Württemberg gefertigt werden, sondern diese zu einem gewissen Anteil auf dem internationalen Markt zugekauft werden, ergibt sich unter Einbezug der in Abbildung 66 dargestellten und vorab errechneten Produktionsanteile das Realistic-Case-Szenario für die Entwicklung des Wertschöpfungspotenzials (siehe Abbildung 67). **Das Wertschöpfungspotenzial Baden-Württembergs bei der Fertigung elektrischer Traktionsmotoren beträgt im Realistic-Case-Szenario für das Jahr 2020 ca. 17 Mio. € und wird auf ca. 84 Mio. € im Jahr 2030 anwachsen.** Die jährliche Wachstumsrate von 18% ist dabei aufgrund der bereits beschriebenen zunehmenden vertikalen Integration durch die Fahrzeughersteller und einer verstärkten Lokalisierung der Produktion der Subkomponenten höher als im Best-Case-Szenario. In der Berechnung des Best-Case-Szenarios beträgt das Wertschöpfungspotenzial für das Jahr 2020 ca. 25 Mio. € und für das Jahr 2030 ca. 113 Mio. € (siehe Abbildung 68). Zwischen den Jahren 2020 und 2024 liegt das Wertschöpfungspotenzial im Best-Case-Szenario so ca. 54% über dem Realistic-Case-Szenario. Die Differenz der beiden Szenarien wird zwischen den Jahren 2025 und 2030 auf ca. 36% sinken und voraussichtlich nach 2030 weiter leicht abnehmen. Für die Berechnungen

wurden dieselben Prämissen wie im Best-Case-Szenario zugrunde gelegt (s. Kapitel 4.2). Die Untersuchung beider Szenarien basiert somit auf der Annahme, dass jeweils die gleichen Stückzahlen an E-Motoren gefertigt werden. **Um eine Angleichung des Realistic-Case-Szenarios an das Best-Case-Szenario zu ermöglichen, bedarf es einer großen gemeinsamen Anstrengung von Industrie, Politik, Forschung und weiteren Akteuren im Land. Eine Stückzahlsteigerung bei der Produktion von E-Motoren im Land kann dazu einen relevanten Beitrag leisten.** Als Beispiel der Unternehmensstrategien kann hierfür die von der Robert Bosch GmbH angestrebte weltweite Marktführerschaft im Bereich der Produktion elektrischer Traktionsmotoren genannt werden. **Jedoch ist auch die Erschließung weiterer Wertschöpfungspotenziale notwendig, wie in den Handlungsempfehlungen dieses Themenpapiers aufgezeigt wird.** Neben der Analyse der Entwicklung des wertschöpfungspotenzials wurden ebenso die Fade-in-Beschäftigungseffekte bei der Produktion elektrischer Traktionsmotoren untersucht. Der Zukauf von E-Motoren-Komponenten auf dem (inter-)nationalen Markt führt zum einen zu einer geringeren Wertschöpfung im Land und zum anderen zu einem geringeren Bedarf an Beschäftigten bei der Produktion elektrischer Traktionsmotoren (siehe Abbildung 69).

Millionen €

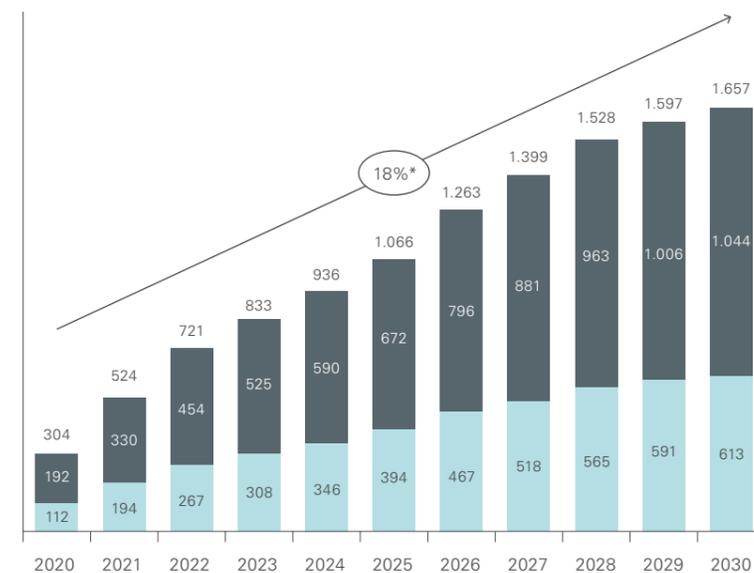


■ Realistic-Case-Szenario
■ Best-Case-Szenario

Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 68: Vergleich des Wertschöpfungspotenzials Realistic- und Best-Case-Szenario

Anzahl Beschäftigte



■ MA Produktion
■ MA indirekte Bereiche

* CAGR

Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 69: Beschäftigungseffekte bei der Produktion elektrischer Traktionsmotoren Baden-Württemberg – Realistic-Case-Szenario

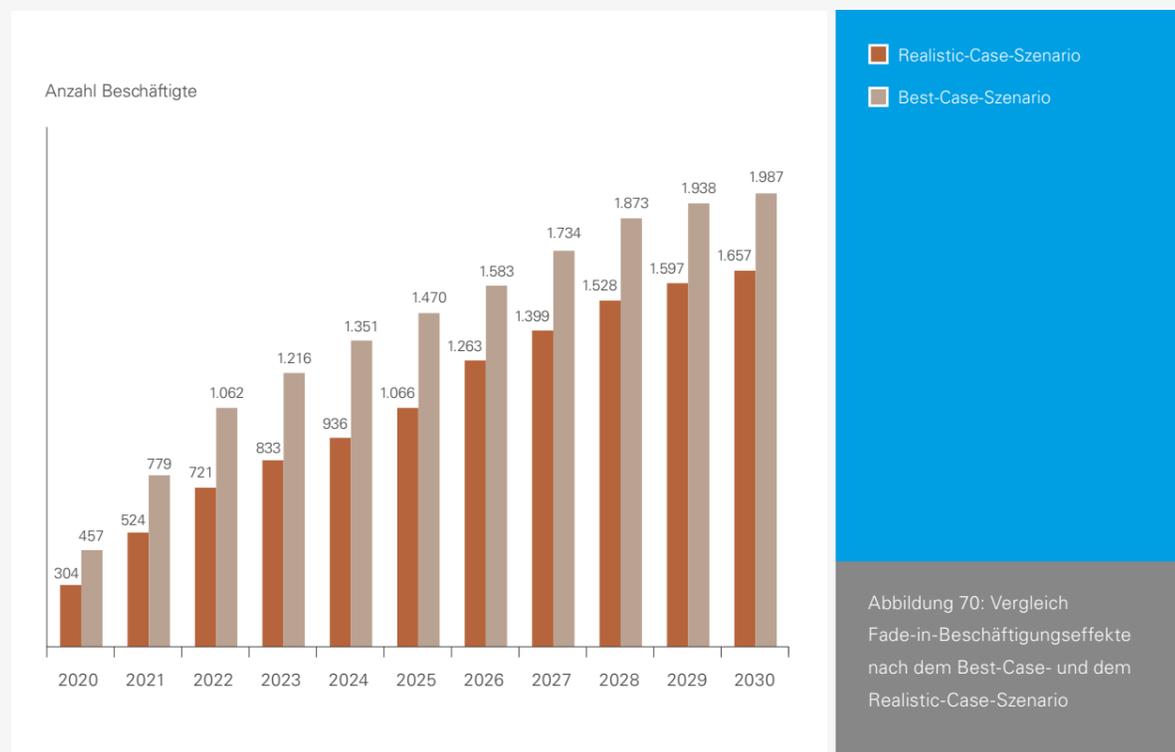


Abbildung 70: Vergleich Fade-in-Beschäftigungseffekte nach dem Best-Case- und dem Realistic-Case-Szenario

Die Betrachtung der **Beschäftigungseffekte des Realistic-Case-Szenarios zeigt, dass im Jahr 2020 ca. 300 Mitarbeitende für die Produktion von Traktionsmotoren** benötigt werden, wovon ca. 190 Mitarbeitende auf die Produktion und ca. 110 Mitarbeitende auf indirekte Bereiche entfallen (Berechnungsgrundlage der Beschäftigungseffekte vgl. Kapitel 4.2). Die Beschäftigungszahlen im Rahmen der E-Motoren-Produktion werden vergleichbar mit der Wertschöpfung mit einer jährlichen Wachstumsrate von ca. 18% steigen und **voraussichtlich auf ca. 1.650 Mitarbeitende im Jahr 2030 anwachsen**. Es kann erwartet werden, dass von diesen 1.650 Mitarbeitenden ca. 1.050 in der Produktion und 600 Mitarbeitende in indirekten Bereichen benötigt werden.

Die Analyse der Beschäftigungseffekte im Best-Case-Szenario ergab einen Bedarf von ca. 460 Mitarbeitenden für das Jahr 2020, was einer Differenz von ca. 48% zum Realistic-Case-Szenario entspricht (Abbildung 70). Bis zum Jahr 2030 wurde eine Beschäftigtenzahl von ca. 2.000 Mitarbeitenden prognostiziert. Damit verringert sich die Differenz auf ca. 20%. Da die Entwicklung der Beschäftigungszahlen an die

Komponentenproduktion und Montage des E-Motors gekoppelt ist, ergibt sich auch bei den Beschäftigungseffekten eine schrittweise Annäherung der Szenarien bis 2030.

Sowohl die Entwicklung des Wertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs als auch die Beschäftigtenzahlen im Real-Case-Szenario liegen zwischen 20% und 40% unter den prognostizierten Entwicklungen des Best-Case-Szenarios. Diese Differenz kann aus heutiger Sicht am ehesten durch eine Stückzahlsteigerung an produzierten E-Motoren ausgeglichen werden. Die Steigerung der Verkaufszahlen müsste wie dargelegt jedoch vorrangig von den umsatzstarken E-Motoren-Herstellern wie der Robert Bosch GmbH, der Mahle GmbH, der ZF Friedrichshafen AG und der Schaeffler Gruppe sowie durch in Baden-Württemberg ansässige OEMs mit E-Motoren-Produktion vorangetrieben werden.

6.

Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse des Themenpapiers

Die durch Klimaschutzmaßnahmen getriebene Elektrifizierung der Mobilität bedeutet einen großen Umbruch für die Wertschöpfungsstrukturen der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg. Denn der Bedarf an Verbrennungsmotoren und deren Komponenten, von dem Baden-Württemberg ca. 14% des europäischen Marktes bedient, wird kontinuierlich sinken. Gleichzeitig wird die Nachfrage nach elektrischen Traktionsmotoren steigen, an denen Baden-Württemberg aktuell nach Schätzungen der Autoren dieses Themenpapiers einen europäischen Marktanteil von 8% besitzt. Bei Komponenten des Verbrennungsmotors liegt dieser Anteil durchschnittlich bei 9%. Dies stellt den Industriestandort Baden-Württemberg mit seinem ausgeprägten Automobilcluster vor große Herausforderungen.

Das vorliegende Themenpapier zeigt auf, wie es durch die Umstellung von Produktionsprozessen, die Intensivierung von Forschung und Entwicklung sowie die Anpassung von Lieferantenbeziehungen gelingen kann, Wertschöpfungspotenziale in der E-Motoren-Technologie zu erschließen und Arbeitsplätze am Standort Baden-Württemberg zu sichern.

Energieeffizienz und Kosten – wichtige Kriterien der Technologiebewertung

Der Permanentmagnet-Synchronmotor (PSM), der Drehstrom-Asynchronmotor (ASM) und der Fremderregte Synchronmotor (FSM) konnten als die heute marktrelevanten Technologien identifiziert werden. Der PSM weist dabei die höchsten Effizienzen auf, aber aufgrund der verwendeten seltenen Erden in den Magneten auch die höchsten Kosten. Der Blick auf den Produktionsprozess, der unabhängig vom

Motorentyp aus vier Hauptschritten – der Produktion des Stators, des Rotors und des Gehäuses sowie der Endmontage – besteht, hat zur Identifikation wesentlicher Technologietrends geführt: der Systemintegration, der Hairpin-Wicklung und höherer Motordrehzahlen (siehe Kapitel 2).

Weltweiter Markt für E-Motoren wächst

Die globalen PKW-Neuzulassungen werden sich voraussichtlich von 51 Mio. Fahrzeugen im Jahr 2020 auf 93 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2030 steigern. Der prognostizierte Anteil der rein batteriebetriebenen Fahrzeuge (BEV) wird von 4% auf 23% steigen und der Anteil reiner Verbrennungsfahrzeuge wird 2030 nur noch ca. 18% betragen.

Der Bedarf an E-Motoren, die je nach Antriebskonzept und Ausstattungsvarianten unterschiedlich ausgelegt werden müssen, wächst deutlich: Neben Traktionsmotoren werden in großer Zahl auch kleine bzw. mittlere Motoren im Fahrzeugbau eingesetzt. Diese Motoren werden beispielsweise als Startermotoren oder für die Bremskraftverstärkung, aber auch für Komfortfunktionen eingesetzt. Für die im Fokus dieses Themenpapiers stehenden elektrischen Traktionsmotoren wurde die Entwicklung der Verkaufszahlen bis zum Jahr 2030 prognostiziert. Weltweit werden bis dahin voraussichtlich ca. 92 Mio. elektrische Traktionsmotoren benötigt, wovon 60% auf den PSM, 33% auf den ASM und 7% auf den FSM entfallen werden.

Ausgehend von einer Bewertung der Produktions- und Materialkosten der relevanten elektrischen Traktionsmotoren konnte sowohl das globale Marktpotenzial als auch das Wertschöpfungspotenzial abgeleitet werden. Das weltweite Marktpotenzial für Traktionsmotoren steigert sich auf Basis der berechneten Prognosen von ca. 5,2 Mrd. € im Jahr 2020

auf ca. 22,2 Mrd. € im Jahr 2030. Die Materialkosten betragen dabei je nach Motorenart zwischen 66% und 73% der Gesamtkosten. Das Wertschöpfungspotenzial umfasst im Gegensatz zum Marktpotenzial nur die Produktion von E-Motoren, da Rohmaterialien und Halbzeuge vornehmlich nicht in Baden-Württemberg hergestellt werden, sondern auf dem internationalen Beschaffungsmarkt zugekauft werden.

Breite Know-how-Basis der E-Motoren-Fertigung in Baden-Württemberg vorhanden – Potenzial, um vom weltweit wachsenden Markt zu profitieren

Eine Auswertung der im Land verfügbaren Kompetenzen ergab, dass alle für die Herstellung eines E-Motors und seiner Komponenten benötigten Kompetenzen bereits vorhanden sind. Ausgenommen wurde in dieser Betrachtung die Herstellung von Halbzeugen und Rohmaterialien. Die Bewertung basiert dabei auf einer Untersuchung von Unternehmen, die Technologien zur Fertigung von E-Motoren und ihrer Komponenten besitzen. Es konnten 61 Unternehmen mit Erfahrungen im Automotive-Bereich oder dem Potenzial zum Großserienlieferanten in der Automobilindustrie identifiziert werden.

Für die Ermittlung des Wertschöpfungspotenzials Baden-Württembergs wurde ein Best-Case-Szenario für 2030 auf Basis des vorher prognostizierten weltweiten Marktpotenzials an elektrischen Traktionsmotoren abgeleitet. Dabei wurden die Produktions- bzw. Materialkosten sowie die im Land abgebildeten Kompetenzen berücksichtigt. Für das Best-Case-Szenario wurde durch die Autoren die Annahme zugrunde gelegt, dass Baden-Württemberg einen Anteil von 8% am europäischen Markt erreicht und mittelfristig halten kann. Aufgrund dieser exogen gesetzten Annahme ergibt sich für das Best-Case-Szenario ein Wertschöpfungspotenzial für E-Motoren entlang der gesamten Wertschöpfungskette von

ca. 25 Mio. € im Jahr 2020 und 113 Mio. € im Jahr 2030 für Baden-Württemberg.

Die aus dem Best-Case-Szenario abgeleiteten Beschäftigungseffekte zeigen einen Anstieg von ca. 460 Mitarbeitenden im Jahr 2020 auf bis zu 2.000 Mitarbeitenden im Jahr 2030. Die Prognose geht davon aus, dass ca. 60% auf die Produktion und ca. 40% auf indirekte Bereiche entfallen könnten.

Die Wertschöpfung findet aktuell vor allem bei den Tier-1-Unternehmen statt. Eine Strategieanalyse der Fahrzeughersteller ergab, dass diese in Zukunft stärker an der Wertschöpfung beteiligt sein werden. Vor allem die Felder Entwicklung, Erprobung und Produktion stehen im Fokus dieser Strategien.

Entwicklung globaler Lieferketten relevant für tatsächliche Realisierung der Wertschöpfungschancen in Baden-Württemberg

Um zu beurteilen, wie wahrscheinlich es ist, dass das wünschenswerte und durch eine breite Know-how-Basis theoretisch mögliche Wertschöpfungspotenzial des Best-Case-Szenarios für Baden-Württemberg erreicht wird, wurden weltweite Produktionsnetzwerke betrachtet und die Marktanteile neuer sowie verkaufsstarker E-Motoren-Hersteller näher betrachtet.

Die Marktprognose für 2025 ergab, dass Unternehmen mit Sitz in Deutschland inklusive ihrer weltweiten Joint Ventures bis 2025 voraussichtlich einen Anteil von ca. 35% der weltweiten Wertschöpfung erwirtschaften könnten. Ob und in welcher Tiefe die Unternehmen diese Wertschöpfung am Standort Deutschland bzw. Baden-Württemberg realisieren, hängt von mehreren Faktoren ab.

Die weiterführende Analyse der globalen Lieferketten ergab, dass insbesondere die OEMs stärker regional fertigen und auch tendenziell ihre Lieferketten regionaler aufbauen. Die Tier-1-Unternehmen hingegen weisen häufig stärkere internationale Verflechtungen auf und beliefern beispielsweise über die Gründung von Joint Ventures oder Tochterfirmen internationale Märkte.

Für die OEMs wurden im Anschluss verschiedene Szenarien der E-Motoren-Bereitstellung diskutiert. Grundsätzlich sind eine komplette Inhouseproduktion, eine teilweise Inhousefertigung und der Zukauf des gesamten E-Motor-Portfolios möglich. Als Standardlieferketten-Szenario konnte die teilweise Inhouseproduktion identifiziert werden. Der Großteil der OEMs hat mittelfristig angekündigt, E-Motoren selbst oder im Rahmen ihrer Konzernstruktur zu montieren und auch teilweise die Komponenten zu produzieren.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der globalen Lieferkettendiskussion wurden in das Best-Case-Szenario integriert, so konnte anschließend ein Realistic-Case-Szenario für die Entwicklung des Wertschöpfungspotenzials in Baden-Württemberg abgeleitet werden. Da Teile der Subkomponenten von den E-Motoren-Produzenten auf dem Weltmarkt zugekauft werden, liegt das Wertschöpfungspotenzial – wie auch die Beschäftigtenzahlen des Realistic-Case-Szenarios – unter dem des Best-Case-Szenarios. Das prognostizierte Wertschöpfungspotenzial wird demnach voraussichtlich 16 Mio. € im Jahr 2020 betragen und sich mit einer jährlichen Wachstumsrate von 18% auf 83 Mio. € im Jahr 2030 steigern.

Um einen relevanten Anteil der europäischen Wertschöpfung durch elektrische Traktionsmotoren in Baden-Württemberg zu erreichen, bedarf es einer Steigerung der Absatzstückzahlen von E-Motoren und einer stärkeren Übernahme der Produktion von Subkomponenten. Jedoch ist auch die Erschließung weiterer Wertschöpfungspotenziale notwendig, wie in den Handlungsempfehlungen dieses Themenpapiers aufgezeigt wird.

6.2. Handlungsempfehlungen und Potenziale durch E-Motoren für das Land Baden-Württemberg

Der Wandel hin zu elektrischen Antriebssystemen für Kraftfahrzeuge erzeugt ein zunehmendes Spannungsfeld zwischen den etablierten Antriebssystemlieferanten und Fahrzeugherstellern. Beide Gruppen suchen nach direkten

Einstiegsmöglichkeiten in die Wertschöpfungsketten und starten von unterschiedlich ausgeprägten Know-how-Positionen. Dabei müssen sich die bislang auf Verbrennungsmotoren spezialisierten Antriebslieferanten vom Produktportfolio und den genutzten Technologien zur Fertigung von elektrischen Antriebsmaschinen vollständig weiterentwickeln. Auf der anderen Seite müssen sich Fahrzeughersteller in die Spezifikation und Entwicklung zukunftsfähiger Integrationslösungen einarbeiten. Beiden Gruppen steht als potenzielle Bedrohung die bereits viel weiter entwickelte Lieferantenlandschaft für elektrische Antriebe in Asien gegenüber. Innerhalb der nächsten Jahre wird der Druck auf die Lieferantenlandschaft in Baden-Württemberg vor allem von zwei Seiten daher stark zunehmen:

- A) durch den globalen Wettbewerb und das globale Sourcing der Fahrzeughersteller von elektrischen Antriebsmaschinen und integrierten elektrischen Achsen;
- B) durch die zunehmende vertikale Integration der Fahrzeughersteller in Richtung elektrischer Achse und Antriebsmaschinen, wodurch sich ein signifikanter Anteil der Wertschöpfung, insbesondere die Endmontage und die Prüfung der elektrischen Antriebssysteme, auf den Fahrzeughersteller selbst verlagern wird.

Daher ist es entscheidend für den Standort Baden-Württemberg, die erforderlichen Potenziale für den Erhalt und das weitere Wachstum der Lieferantenlandschaft umzusetzen.

1. Förderung von Technologiekompetenz bei der Entwicklung und Produktion von elektrischen Traktionsmotoren

Um das im Themenpapier dargestellte Wertschöpfungspotenzial im Bereich elektrischer Traktionsmotoren am Standort Baden-Württemberg realisieren zu können, ist es notwendig, verstärkt in die Entwicklung innovativer Technologien und Fertigungskompetenz zu investieren. Angesichts der internationalen Wettbewerbssituation ist es entscheidend, dass durch geeignete Förderprogramme und andere Maßnahmen Investitionen von Unternehmen an den Standort Baden-Württemberg gelenkt werden. Hier können unter anderem die Aktivitäten der Cluster-Initiativen des Landes Baden-Württembergs einen Beitrag leisten.

Förderaktivitäten sollten sich auf die beschriebenen Trends zur Verbesserung der Motorentechnologien konzentrieren,

um Baden-Württemberg bei Kunden und Technologieexperten als Kompetenzzentrum zu positionieren. Hierzu gehören unter anderem eine verstärkte Integration des E-Motors in der sog. E-Achse und die Steigerung der Effizienz sowie der gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichte. Für die Produktion ist es von zentraler Bedeutung, auch bei geringen Stückzahlen E-Motoren profitabel produzieren zu können. Dafür gilt es, das Know-how bei flexiblen Produktionssystemen auszubauen und den Gesamtproduktionsprozess zu optimieren.

Durch Technologieführerschaft bei Materialien, Komponenten und Prozessen könnten die lokale Ansiedelung von Komponenten- und E-Motoren-Herstellern sowie der Ausbau von Forschungskompetenzen innerhalb Baden-Württembergs maßgeblich verstärkt werden.

2. Steigerung der Attraktivität Baden-Württembergs als Standort für E-Motoren-Produktion

Um Baden-Württemberg als Standort für die Produktion von elektrischen Traktionsmotoren attraktiv zu machen, muss eine Optimierung des E-Motoren-Designs hinsichtlich Industrialisierungsfähigkeit und kostenoptimierter Großserienproduktion erfolgen. Zu diesen Optimierungen gehören beispielsweise die in Kapitel 2.3 beschriebenen Technologietrends wie die kontinuierliche Hairpin-Wicklung, neue Kühlkonzepte und eine verbesserte Isolation des Wicklungsdrahts. Diese Technologietrends zielen auf eine Verbesserung der Fertigungseffizienz und der Produktperformance ab – sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene.

Entscheidend für die baden-württembergischen Unternehmen ist somit, neben der Innovationsführerschaft bei Materialien, Komponenten und Prozessen eine konsequente Verbesserung bestehender Kostenstrukturen in der Produktion zu erlangen. Die Implementierung hocheffizienter Großserienproduktionen bietet für Unternehmen aus Baden-Württemberg Potenziale, auch kostenseitig auf internationaler Ebene wettbewerbsfähig zu sein. Innovative Verbesserungen im Herstellungsverfahren sowie der Ausbau hocheffizienter Produktionsprozesse kann dem aktuellen kostenseitigen Wettbewerbsnachteil des Produktionsstandorts Deutschland entgegenwirken. Im Vergleich zur Fertigung in „Niedriglohnländern“ wie China und an alternativen europäischen Produktionsstandorten müssen erhöhte Lohn- und Nebenkosten ausgeglichen werden, um Arbeitsplätze entstehen zu lassen.

3. Befähigung etablierter mittelständischer Unternehmen und Ansiedlung neuer Unternehmen

Um weitere Wertschöpfungspotenziale für Baden-Württemberg zu generieren, sollte eine Integration der international zugekauften (Sub-)Komponenten (siehe Kapitel 5.2.1) in die Produktionslandschaft Baden-Württemberg angestrebt werden. Grundsätzlich sind alle Kompetenzen, die bei der Herstellung von E-Motoren von Bedeutung sind, im Land verfügbar. Der Fokus der E-Motoren-Produktion für den Traktionsantrieb liegt in Baden-Württemberg aufgrund der Kostensituation derzeit jedoch vornehmlich auf der Montage von Stator, Rotor und des gesamten E-Motors. Mit steigendem Bedarf an E-Motoren, der Designoptimierung hinsichtlich Herstellbarkeit sowie der von den Fahrzeugherstellern angekündigten vertikalen Integration sollte jedoch auch das Potenzial bei der Produktion von Komponenten und Subkomponenten erschlossen werden.

Für die Verlagerung der Fertigung von Subkomponenten nach Baden-Württemberg kommt u.a. mittelständischen Unternehmen eine Schlüsselrolle zu, die sich mit geeigneter Unterstützung neue Geschäftsfelder erschließen könnten, indem sie auf bereits in den Unternehmen vorhandene Grundkompetenzen für die Herstellung von Komponenten und Subkomponenten des E-Motors aufbauen.

Um diese Potenziale zu erkennen, kommt dem Wissenstransfer und der einzelbetrieblichen Beratung eine große Bedeutung zu. Cluster-Initiativen und Angebote wie der Beratungsgutschein „Transformation Automobilwirtschaft“ des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg können hier einen Beitrag leisten.

Das Vorhaben der Verlagerung wird durch einen starken Wettbewerbsdruck, vorrangig aus Ländern mit günstigeren Kostenstrukturen, erschwert. Eine Unterstützung durch staatliche Subventionen in der Phase des Umschwungs könnte hierbei einen Wettbewerbsvorteil ermöglichen.

Neben der Befähigung vorhandener Unternehmen kann auch die Förderung von Neuansiedlungen entsprechender Unternehmen zu einer gesteigerten Wertschöpfung in Baden-Württemberg beitragen. Dafür muss die Erschließung geeigneter Flächen vorangetrieben werden, die Qualifizierung der Fachkräfte auf exzellentem Niveau forciert und Baden-Württemberg als „Ökosystem“ für innovative Technologien etabliert werden.

4. Beobachtung des Trends zur vertikalen Integration

Um rechtzeitig auf Strategieänderungen der OEMs reagieren zu können, sollte der aktuelle Trend zur Erhöhung der Fertigungstiefe beobachtet und in regelmäßigen Intervallen auf Gültigkeit geprüft werden.

Aktuell ist durch den erwarteten Rückgang der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und die somit sinkende Relevanz des Verbrennungsmotors bei den Fahrzeugherstellern eine Strategie der vertikalen Integration der E-Motoren-Produktion bei OEMs feststellbar.

Zum momentanen Zeitpunkt ist jedoch nur bedingt abschätzbar, ob der E-Motor in Zukunft zu einer Differenzierungs-komponente wird oder ob Synergien und Skaleneffekte über die zukünftige Ansiedlung der Produktion entscheiden. Letzteres Szenario würde eine Produktion der E-Maschine z.B. bei Tier-1-Zulieferern, ähnlich wie in der Vergangenheit, bedeuten. Für das Land Baden-Württemberg ist daher die zukünftige strategische Positionierung des E-Motors seitens der Fahrzeughersteller entscheidend.

Diese Ankündigungen wurden in den Berechnungsmodellen des vorliegenden Themenpapiers berücksichtigt. Sie führen zu einer Erhöhung des Wertschöpfungspotenzials durch die stärkere Ansiedlung der Komponentenproduktion sowie durch eine lokale Produktion des E-Motors seitens der im Land ansässigen OEMs.

5. Realisierung von Wertschöpfungspotenzialen an den Schnittstellen des E-Motors zum Gesamtfahrzeug

Um weitere Wertschöpfungspotenziale für Unternehmen in Baden-Württemberg zu erschließen, sollten entstehende Chancen im Bereich Vernetzung mit Leistungselektronik sowie deren Steuerungssoftware und durch die Einbindung in die gesamte Fahrzeugelektronik betrachtet werden.

Zusätzlich zu den Wertschöpfungspotenzialen in der Entwicklung und Produktion von E-Motoren ergeben sich an den Schnittstellen des E-Motors z. B. zu Inverter und Getriebe sowie an den Schnittstellen in die Fahrzeugsteuerung weitere Potenziale. Gerade Systemlieferanten haben hier die Möglichkeit, von ihrem Know-how im Bereich des Verbrennungsmotors zu profitieren und entsprechende Schnittstellenkomponenten und Software beizusteuern.

Neben den angesprochenen Wertschöpfungspotenzialen an den direkten Schnittstellen ergeben sich weitere Potenziale durch eine innovative Vernetzung der Steuerung des E-Motors mit dem Gesamtfahrzeug. Dabei können in Abhängigkeit von der Antriebsstopologie Funktionen wie Torque Vectoring oder eine Vernetzung des Antriebsstrangs mit dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) in das Fahrzeug integriert werden.

6. Transfer von Know-how aus Erprobung und Validierung des konventionellen Antriebs auf E-Motoren

Um die bei der Erprobung, Validierung und Qualitätssicherung des konventionellen Antriebsstrangs gewonnenen Kompetenzen zu nutzen, sollten diese nach Möglichkeit auf die Absicherung des E-Motors und des gesamten E-Antriebsstrangs transferiert werden.

Das automobiler Cluster in Baden-Württemberg zeichnet sich durch eines der am stärksten ausgeprägten Entwicklungszentren für Antriebsstränge weltweit aus. Diese Kompetenz spiegelt sich auch in dem von der Strukturstudie BW^e mobil 2019 ausgewiesenen Wertschöpfungsanteil Baden-Württembergs von 12% am europäischen Markt bei der Produktion von Verbrennungsmotoren und deren Bauteilen wider.

Die hierbei gewonnenen Kompetenzen bei der Erprobung, Validierung und Qualitätssicherung des konventionellen Antriebsstrangs sollten auf die Absicherung des E-Motors und des gesamten E-Antriebsstrangs transferiert werden. Besonders geht es hier um das Testing und die Applikation von E-Maschinen, Invertern, elektrischen Zusatzkomponenten sowie Hybridantrieben und deren Eigenschaften in Bezug auf Wirkungsgrad, Lebensdauer oder Verhalten unter Umweltbedingungen. Unternehmen, die sich auf die Auslegung und den Bau von Prüfständen und zugehöriger Software spezialisiert haben, können hier neue Geschäftsfelder und Wertschöpfungspotenziale erschließen. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang auch das Testen von Antrieben in einer frühen Projekt- bzw. Entwicklungsphase.

Im Falle der Batterie sind darüber hinaus auch weitere Tests für die Validierung der Lebensdauer und aufgrund der erhöhten Sicherheitsanforderungen notwendig.

7. Förderung weiterer Wertschöpfungspotenziale im erweiterten Wertschöpfungscluster Maschinen- und Anlagenbau

Um von weiteren Möglichkeiten der Wertschöpfung bei der Produktion von E-Motoren zu profitieren, ist es – wie bei der Produktion von Verbrennungsmotoren – relevant, die Produktionsausrüster als wichtigen Akteur in die Wertschöpfungskette einzubeziehen. Bestimmte Fertigungstechnologien machen es sogar erst möglich, E-Motoren wettbewerbsfähig im Land zu produzieren. Der baden-württembergische Maschinen- und Anlagenbau sollte daher im Kontext der E-Motoren-Produktion als wettbewerbsentscheidender Technologielieferant gesehen werden.

Neben der eigentlichen Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen und Antriebssträngen gehören auch Unternehmen des Maschinenbaus zum erweiterten Wertschöpfungscluster der Automobilindustrie in Baden-Württemberg. Diese Unternehmen und ihre Mitarbeitenden, die Produktionsausrüstung für die Montage, Komponentenproduktion und Messtechnik für die Erprobung herstellen, werden mit insgesamt ca. 30.000 Beschäftigten in der Strukturstudie BW^e mobil 2019 ausgewiesen.

Des Weiteren muss beachtet werden, dass der potenzielle Absatzmarkt des baden-württembergischen Maschinen- und Anlagenbaus nicht ausschließlich auf die regionale Produktion des elektrischen Antriebsstrangs begrenzt ist. Vielmehr wird weltweit ein Markt für Maschinen und Anlagen für die Herstellung von ca. 92 Mio. Traktionsmotoren im Jahr 2030 entstehen.

8. Analyse weiterer möglicher Wertschöpfungspotenziale bei Rohmaterialien und Halbzeugen

Um den Wertschöpfungsanteil weiter zu erhöhen, besteht unter optimalen Bedingungen auch die Möglichkeit, weitere Schritte der Wertschöpfungskette im Rahmen der Verarbeitung von Rohmaterialien zu Halbzeugen für die Herstellung von elektrischen Traktionsmotoren im Land zu etablieren.

In Baden-Württemberg liegt der Fokus bei der E-Motorenproduktion derzeit hauptsächlich auf der Fertigung der Motoren und ihrer Komponenten. Diese umfassen wie in Kapitel 3.2.3 aufgezeigt durchschnittlich ca. 30% der Wertschöpfung eines E-Motors. Für Baden-Württemberg kommen hier hauptsächlich Wertschöpfungsschritte im Bereich

der Herstellung von Halbzeugen in Frage. Dazu zählen die Produktion von Elektrolechen und Wickeldraht sowie weitere Komponenten aus Rohmaterial wie Magneten. Im Rahmen der Produktion von Verbrennungsmotoren wurden diese Produktionsschritte im Zuge der Fokussierung auf die Kernkompetenzen sowie aufgrund der Kostensituation im Land jedoch weitestgehend in Best Cost Countries ausgelagert. Nach den Erfahrungen in der COVID-19-Pandemie sollte diese Strategie jedoch mit Blick auf die Resilienz der Lieferketten überdacht werden.

Auch um eine zukünftig entfallende Wertschöpfung durch den Wandel zur Elektromobilität auszugleichen sowie dem stark zunehmenden Bedarf an E-Motoren Rechnung zu tragen, ist eine entsprechende Produktion in Baden-Württemberg zu prüfen.

Literaturverzeichnis

Auer, M., 2016. Ein Beitrag zur Erhöhung der Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs durch prädiktives Thermomanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien ISBN: 978-3-658-13209-5.

Bauer, W. et al., 2018. ELAB 2.0. Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland. 2. Auflage, Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

Binder, A., 2012. Elektrische Maschinen und Antriebe – Grundlagen, Betriebsverhalten. Berlin: Springer-Verlag ISBN: 978-3-540-71849-9.

Binder, A. & Knopik, T., 2010. Elektromotorische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. s.l., s.n.

Böge, A., 2007. Zerspantechnik in Böge, A. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Maschinenbau. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag.

BorgWarner Inc., 2020. BorgWarner beliefert drei Hersteller mit effizienten und leichten elektrischen Antriebsmodulen (eDM). [Online] Available at: [https://www.borgwarner.com/docs/default-source/press-release-downloads/borgwarner-beliefert-drei-hersteller-mit-effizienten-und-leichten-elektrischen-antriebsmodulen-\(edm\).pdf](https://www.borgwarner.com/docs/default-source/press-release-downloads/borgwarner-beliefert-drei-hersteller-mit-effizienten-und-leichten-elektrischen-antriebsmodulen-(edm).pdf)

Boston Consulting Group (BCG), 2020. <https://www.bcg.com/de-de/>. [Online] Available at: https://image-src.bcg.com/Images/Auto%20post%20COVID-19_052920_tcm9-249607.pdf [Zugriff am 04.11.2020].

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – BMVI, 2020. www.bmvi.de. [Online] Available at: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am 23.11.2020].

Burkert, A., 2014. Welcher ist der beste Elektromotor für Elektrofahrzeuge? [Online] Available at: <https://www.springerprofessional.de/automobil--motoren/elektromotor/welcher-ist-der-beste-elektromotor-fuer-elektrofahrzeuge/6586358> [Zugriff am 24.09.2020].

BYD, 2020. BYD company profile. [Online] Available at: <https://bydeurope.com/pdp-auto> [Zugriff am 12.11.2020].

Doerr, J., Attensperger, T., Wittmann, L. & Enzinger, T., 2018. Die neuen elektrischen Achsantriebe von Audi. ATZelextronik 13(3), p. 16–26.

Dorner, D., Telger, K., Basteck, A. & Tietz, M., 2009. Nichtkornorientiertes (NO-)Elektroband zur Herstellung von elektrischen Antrieben für Kraftfahrzeuge. ThyssenKrupp techforum 2009(1), p. 28–33.

Dunkermotoren GmbH, 2018. www.dunkermotoren.de. [Online] Available at: https://www.dunkermotoren.de/fileadmin/files/downloads/Kundenmagazin/Kundenmagazin_Ausgabe2_Web.pdf [Zugriff am 21.10.2020].

electrive.net, 2019. Hyundai Mobis baut neues Werk für E-Auto-Komponenten. [Online] Available at: <https://bit.ly/3IH6JO3> [Zugriff am 28.06.2021].

Elektroauto-News.net, 2017. Magna gründet Joint-Venture mit SAIC für E-Antriebe. [Online] Available at: <https://www.elektroauto-news.net/2017/magna-joint-venture-saic-e-antriebe-china> [Zugriff am 28.06.2021].

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, 2019. Strukturstudie BW^e mobil 2019 – Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung, Stuttgart: e-mobil BW.

Field, K., 2019. Tesla's Vertical Integration Unlocks Hidden Flexibility & Innovation. [Online] Available at: <https://cleantechnica.com/2019/03/30/teslas-vertical-integration-unlocks-hidden-flexibility-innovation/> [Zugriff am 12.11.2020].

Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G. & Pollak, B., 2016. Das Getriebebuch. 2. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, ISBN: 978-3-658-13104-3.

Fleischer, J., Haag, S. & Hofmann, J., 2017. Quo Vadis Wickeltechnik? – Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau. Karlsruhe, s.n.

Franken, M., 2013. Made by VOIT. GIESSEREI 100, pp. 29–35.

Füßel, A., 2017. Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität – Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Gassmann, T., Gueth, D. & Haupt, J., 2017. Lastschaltfähiges Zweiganggetriebe einschließlich Torque-Vectoring-Funktion. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 119(10), p. 50–55.

General Motors, 2011. GM Electric Motors Plant is First for Major U.S. Automaker. [Online] Available at: https://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2011/May/0517_baltimore.html [Zugriff am 28.06.2021].

Gwinner, P., Stahl, K., Rupp, S. & Strube, A., 2017. Innovatives Hochdrehzahl-Antriebsstrangkonzzept für hocheffiziente elektrische Fahrzeuge. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 119(3), p. 72–75.

Hagedorn, J., Sell-Le Blanc, F. & Fleischer, J., 2016. Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Berlin: Springer-Verlag, ISBN 978-3-662-49210-9.

Heizenröther, M., 2005. Das Stirnraddifferenzial mit Innenverzahnung im Vergleich zum Kegelraddifferenzial inklusive einer Sperrwertanalyse. München: Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik, ISBN: 3-89791-355-0.

Illiano, E., 2013. Die stromerregte Synchronmaschine als hocheffizienter Traktionsmotor in Elektrofahrzeugen. ATZelextronik 8(4), p. 304–309.

Industrial Media, LLC., 2007. Hyundai Mobis Investing In U.S. Parts Plant. [Online] Available at: <https://bit.ly/32XFWFY> [Zugriff am 28.06.2021].

Junker, S., 2007. Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten. Bamberg: Meisenbach; Band 183.

Kampker, A., 2014. Elektromobilproduktion. Berlin: Springer Verlag ISBN: 978-3-642-42021-4.

Kampker, A., Vallée, D. & Schnettler, A., 2013. Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin: Springer-Verlag ISBN: 978-3-642-31985-3.

Klocke, F., 2015. Fertigungsverfahren 5 – Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing. Berlin: Springer-Verlag, 4. Auflage.

Laurent, A., 2019. „NEUER RENAULT ZOE: DIE FABRIKATIONS-GEHEIMNISSE EINES 100%IGEN RENAULT-MOTORS“ [Online] Available at: <https://easyelectriclife.groupe.renault.com/de/expertenbeitraege/neuer-renault-zoe-fabrikationsgeheimnisse/> [Zugriff am 28.06.2021].

Leidhold, R., 2012. Elektrische Maschinen Für Elektro-Und Hybridfahrzeuge. MTZ – Motortechnische Zeitschrift 73(9), p. 692–699.

Leidich, E., 2008. Welle-Nabe-Verbindungen. In: Konstruktionselemente. Berlin: Springer-Verlag.

Mintenbeck, F., 2018. HANDTMANN ERHÄLT AUSZEICHNUNG FÜR AUDI GETRIEBEGEHÄUSE DL382E. [Online] Available at: <https://www.handtmann.de/aktuelles/inmotion/inmotion-artikel/inmotion-februar-2018/> [Zugriff am 28.06.2021].

Mogge, F., 2020. rolandberger.com. [Online] Available at: <https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/Covid-19-highlights-automotive-industry%27s-structural-deficits.html> [Zugriff am 04.11.2020].

Mühlberg, G., Hackmann, W. & Buzziol, K., 2017. Hoch integrierter elektrischer Antriebsstrang. ATZelextronik 12(4), p. 42–45.

Nissan Motor Co., Ltd., 2020. PLANT INTRODUCTION. [Online] Available at: <https://www.nissan-global.com/EN/PLANT/YOKOHAMA/> [Zugriff am 28.06.2021].

Nitsche, E. & Naderer, M., 2017. Innengekühlte Hohldrähte Verdopplung der Leistungsdichte von E-Motoren. ATZelextronik 12(3), pp. 44–49.

Pietschmann, J., 2003. Industrielle Pulverbeschichtung – Grundlagen, Anwendungen, Verfahren. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8348-9371-0.

Pischinger, S. & Seiffert, U., 2016. Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 9783658095277.

Ponn, J. & Lindemann, U., 2011. Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestalltlösungen. Berlin: Springer-Verlag, 2. Auflage.

Raedt, H.-W., Dahme, M., Hirschvogel, M. & Kettner, P. e. a., 2014. Massivumgeformte Komponenten. s.l.:EGGER Druck + Medien GmbH, Landsberg am Lech, 2. Auflage.

Reif, K., 2011. Bosch Autoelektrik und Autoelektronik – Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme, 6. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, ISBN: 978-3-8348-1274-2.

Reif, K., Noreikat, K.-E. & Borgeest, K., 2012. Kraftfahrzeug-Hybridantriebe – Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag ISBN: 978-3-8348-0722-9.

Robert Bosch GmbH, 2019. Elektromobilität: Auf dem Weg zum Marktführer, Medien-ID #1826848. [Online] Available at: <https://bit.ly/2UA4os7> [Zugriff am 28.06.2021].

Rudschies, W., 2019. Porsche-Werk Zuffenhausen: Die Autofabrik der Zukunft. [Online] Available at: <https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/porsche-mission-e-und-autofabrik-der-zukunft-2018/> [Zugriff am 30.10.2020].

Schaal, S., 2019. Audi erweitert Elektromotoren-Produktion in Győr. [Online] Available at: <https://www.electrive.net/2019/07/25/audi-erweitert-elektromotoren-produktion-in-gyoer/> [Zugriff am 24.11.2020].

Schermann, M., 2013. Elektrische Achse – HV-Komponenten und System. ATZelextronik 8(2), p. 98–103.

Schwarzer, C. M., 2018. Unter Strom im Porsche Cayenne E-Hybrid – Warum Plug-in-Hybride bei Porsche-Kunden zunehmend populärer werden. [Online] Available at: <https://www.electrive.net/2018/11/18/unter-strom-im-porsche-cayenne-e-hybrid/> [Zugriff am 24.09.2020].

Specovius, J., 2013. Grundkurs Leistungselektronik – Bauelemente, Schaltungen und Systeme. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, ISBN: 978-3-8348-2447-9.

Stricker, K., Gerrits, M. & Tsang, R., 2020. www.bain.com. [Online] Available at: <https://www.bain.com/insights/forecasting-covid-19-effect-on-the-auto-industry-infographic/> [Zugriff am 11.04.2020].

Tochtermann, J., Ackel, M., Schreier, H. & Walter, K., 2017. Integrierte elektrische Lkw-Achse für den innerstädtischen Verteilerverkehr. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, p. 60–65.

Tschöke, H. (.), 2015. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Basiswissen. Wiesbaden: Springer Fachmedien, ISBN: 978-3-658-04644-6.

Voit Automotive GmbH, 2017. E-MOBILITÄT VOIT ELEKTRISIERT! [Online] Available at: <https://voit.de/wp-content/uploads/2018/04/VT-broschure-eMobility-D-0317-Bogen-lowres.pdf> [Zugriff am 28.06.2021].

Weck, M., 2005. Werkzeugmaschinen 1 – Maschinenarten und Anwendungsbereiche. Berlin: Springer-Verlag, 6. Auflage.

Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J. & Spura, C., 2017. Roloff/Matek Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung. 23., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-17896-3.

ZF, 2019. ZF und Wolong Electric planen Joint Venture für die Produktion von Elektromotoren und -komponenten. [Online] Available at: https://press.zf.com/press/de/releases/release_13122.html [Zugriff am 30.10.2020].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Weltweite Marktanteile für Traktionsmotoren bis 2030	7	Abbildung 41:	Weltweites Marktpotenzial für Traktionsmotoren bis 2030	56
Abbildung 2:	E-Motoren im Überblick	13	Abbildung 42:	Weltweites Marktpotenzial für E-Motoren in PKW nach Leistungsstufe	57
Abbildung 3:	Schematischer Aufbau eines elektrischen Antriebsmotors	14	Abbildung 43:	Wertschöpfungsverteilung des weltweiten Marktpotenzials für Traktionsmotoren bis 2030	58
Abbildung 4:	Aufbau PSM	15	Abbildung 44:	Marktpotenziale entlang der Wertschöpfungskette für Traktionsmotoren bis 2030	59
Abbildung 5:	Aufbau FSM	16	Abbildung 45:	Untersuchung von Unternehmen mit Kompetenzen zur E-Motoren-Fertigung	62
Abbildung 6:	Aufbau ASM	16	Abbildung 46:	Wertschöpfungssplit der Komponentenproduktion am Beispiel PSM	62
Abbildung 7:	Aufbau BLDC	17	Abbildung 47:	Detailanalyse potenzieller E-Motoren- und Komponentenhersteller	63
Abbildung 8:	Vergleich der Motorkonzepte	18	Abbildung 48:	Produktionslandkarte Traktionsmotoren Baden-Württemberg, OEMs und Tier-1	65
Abbildung 9:	E-Motor-Konzepte und deren Kategorisierung	19	Abbildung 49:	Produktionslandkarte Traktionsmotoren Baden-Württemberg, Tier-2 und Tier-n	66
Abbildung 10:	Anwendungsgebiete der unterschiedlichen Motortypen	20	Abbildung 50:	Produktionslandkarte und Kompetenzübersicht Traktionsmotoren Baden-Württemberg	67
Abbildung 11:	Übersicht Motorkonzepte und Anwendungsgebiete im Fahrzeug	22	Abbildung 51:	Ableitung des Best-Case-Szenarios zur Wertschöpfung in Baden-Württemberg	70
Abbildung 12:	Übersicht Antriebstopologien in Hybridfahrzeugen	23	Abbildung 52:	Verteilung des Wertschöpfungspotenzials in Abhängigkeit von der E-Motoren-Art	71
Abbildung 13:	Komponenten im elektrischen Antriebsstrang	24	Abbildung 53:	Ableitung des Wertschöpfungspotenzials von Baden-Württemberg vom europäischen Wertschöpfungspotenzial	72
Abbildung 14:	Referenz Produktionsprozess elektrischer Maschinen	25	Abbildung 54:	Wertschöpfungspotenzial Baden-Württembergs am Weltmarkt für Traktionsmotoren in Mio. €	73
Abbildung 15:	Technologiealternativen bei der Herstellung des Blechpakets	26	Abbildung 55:	Entwicklung der europäischen Absatzzahlen von elektrischen Traktionsmotoren	77
Abbildung 16:	Technologiealternativen in der Statorproduktion	27	Abbildung 56:	Prognostizierte Entwicklung der E-Motoren-Produktion in Baden-Württemberg	78
Abbildung 17:	Technologiealternativen in der Wellenproduktion	28	Abbildung 57:	Beschäftigungseffekte Best-Case-Szenario für Baden-Württemberg	79
Abbildung 18:	Technologiealternativen in der Rotorproduktion	29	Abbildung 58:	Prognose der Marktanteile der E-Motoren-Hersteller für das Jahr 2025	82
Abbildung 19:	Technologiealternativen in der Herstellung des Gehäuses	30	Abbildung 59:	Prognose der Marktanteile der an der Produktion von E-Motoren beteiligten OEMs für das Jahr 2025	83
Abbildung 20:	Technologiealternativen in der Endmontage elektrischer Maschinen	31	Abbildung 60:	Prognose der Marktanteile der an der Produktion von E-Motoren beteiligten Tier-1-Zulieferer für das Jahr 2025	84
Abbildung 21:	Technologietrends und deren Auswirkungen auf die Wertschöpfung	32	Abbildung 61:	Repräsentative Lieferketten zwischen OEMs, Tier-1-Zulieferern und Komponentenherstellern	86
Abbildung 22:	Achsintegrationsstufen	34	Abbildung 62:	Mögliche Strategien bei der Fertigung von E-Motoren bei OEMs	90
Abbildung 23:	Technologietrends und deren Implikationen für die Wertschöpfung	36	Abbildung 63:	Verteilung der Wertschöpfungen in Abhängigkeit von der Fertigungsstrategie der OEMs	91
Abbildung 24:	Methodik zur Prognose des Markthochlaufs elektrifizierter PKW	42	Abbildung 64:	Marktanteile deutscher Unternehmen an der globalen E-Motoren-Produktion für das Jahr 2025	93
Abbildung 25:	Globale Entwicklung PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart	43	Abbildung 65:	Ableitung des Realistic-Case-Szenarios zur Wertschöpfung in Baden-Württemberg	94
Abbildung 26:	Fahrzeugneuzulassungen China	44	Abbildung 66:	Produktionsanteile Baden-Württembergs auf Basis der Standardlieferkette	95
Abbildung 27:	Fahrzeugneuzulassungen Europa	45	Abbildung 67:	Potenzielle Wertschöpfung Realistic-Case-Szenario Baden-Württemberg	96
Abbildung 28:	Fahrzeugneuzulassungen Nordamerika	45	Abbildung 68:	Vergleich des Wertschöpfungspotenzials Realistic- und Best-Case-Szenario	96
Abbildung 29:	Fahrzeugneuzulassungen Rest der Welt (ROW) alle Länder außer China, Europa Nordamerika	46	Abbildung 69:	Beschäftigungseffekte bei der Produktion elektrischer Traktionsmotoren Baden-Württemberg – Realistic-Case-Szenario	97
Abbildung 30:	Globale PKW-Fahrzeugneuzulassungen mit COVID-19-Effekt	47	Abbildung 70:	Vergleich Fade-in-Beschäftigungseffekte nach dem Best-Case- und dem Realistic-Case-Szenario	98
Abbildung 31:	Segmentierung der Fahrzeuge nach Preiskategorien	48			
Abbildung 32:	Globale Entwicklung der PKW-Neuzulassungen nach Preiskategorie (inkl. COVID-19-Effekt)	49			
Abbildung 33:	Übersicht Anzahl verbauter E-Motoren in Abhängigkeit von Antriebsart und Preiskategorie	49			
Abbildung 34:	Weltweite Entwicklung der Nachfrage nach E-Motoren für PKW nach Technologien	50			
Abbildung 35:	Weltweite Entwicklung der Nachfrage nach E-Motoren für PKW nach Leistungsstufen	51			
Abbildung 36:	Weltweite Marktanteile für Traktionsmotoren bis 2030	52			
Abbildung 37:	Verteilung Material- und Produktionskosten PSM	53			
Abbildung 38:	Verteilung Material- und Produktionskosten ASM	54			
Abbildung 39:	Verteilung Material- und Produktionskosten FSM	55			
Abbildung 40:	Durchschnittliche Kosten für Traktionsmotoren	55			

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gegenüberstellung der Motorkonzepte mit Fahrzeugbeispielen	18
Tabelle 2:	Prognostizierte Veränderung der Wertschöpfung durch Trends im Bereich der E-Motoren- und Produktionstechnologie	74
Tabelle 3:	Übersicht zu repräsentativen Lieferketten zwischen OEMs, Tier-1-Zulieferern und Komponentenherstellern auf Basis öffentlich zugänglicher Quellen	88

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (engl. Alternating Current)
ASM	Drehstrom-Asynchronmotor
BEV	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug (engl. Battery Electric Vehicle)
BLDC	Bürstenloser Gleichstrommotor (engl. Brushless Direct Current)
CAGR	Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (engl. Compound Annual Growth Rate)
DC	Gleichstrom (engl. Direct Current)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EV	Elektrofahrzeug (engl. Electric Vehicle)
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl. Fuel Cell Electric Vehicle)
FSM	Fremderregter Synchronmotor
HEV	Hybridelektro kraftfahrzeug (engl. Hybrid Electric Vehicle)
HV	Hochvolt
ICE	Verbrennungsmotor (engl. Internal Combustion Engine)
IMG	Integrierter Motorgenerator
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kW/Kg	Leistungsgewicht (Kilogramm pro Kilowatt)
LKW	Lastkraftwagen
MHEV	Mild-Hybrid (engl. Mild Hybrid Electric Vehicle)
Mio.	Million
Mrd	Milliarde
NVH	Spür- und hörbare Nebengeräusche und Vibrationen (engl. Noise Vibration Harshness)
OEM	Erstausrüster (engl. Original Equipment Manufacturer)
PHEV	Plug-in-Hybrid (engl. Plug-in-Hybrid Electric Vehicle)
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanentmagnet-Synchronmotor
ROW	Rest der Welt (engl. Rest of the World)
SG&A	Vertriebsgemeinkosten (engl. Selling, General and Administrative Expenses)
SOP	Beginn der Serienproduktion (engl. Start of Production)
SRM	Geschalteter Reluktanzmotor (engl. Switched Reluctance Motor)
TCO	Gesamtkosten des Betriebs (engl. Total Cost of Ownership)
U/min	Umdrehungen pro Minute
V	Volt
W	Watt
WLTC	Homologationszyklus, weltweit einheitliches Leichtfahrzeug-Testverfahren (engl. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle)
xEV	jede Art von Elektrofahrzeug (oder Electric Vehicle, EV). Dazu zählen BEV, FCEV und PHEV

Impressum

Herausgeber

Cluster Elektromobilität Süd-West c/o
e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autoren

Robert Stanek Global Advisor E-Mobility, Member of the Board (P3)	Johannes Flemming Senior Consultant E-Powertrain (P3)
--	--

Jana Kirchen Team Lead E-Powertrain (P3)	Lisa Steiner Senior Consultant E-Mobility (P3)
---	---

Andreas Klein Team Lead Technical Due-Diligence & Strategy Consulting (P3)	Dr. Tobias Knecht Senior Consultant E-Mobility (P3)
---	--

Markus Rupp
Senior Consultant Cost Management & E-Mobility (P3)

Redaktion und Koordination des Themenpapiers

e-mobil BW GmbH
Isabell Knüttgen, Katja Gicklhorn, Walter Holderried, Stephan Braun

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag: © Gorodenkoff/shutterstock
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden sich auf der jeweiligen Seite.

Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH, Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0, Fax +49 711 892385-49, info@e-mobilbw.de, www.e-mobilbw.de

Juli 2021

© Copyright liegt bei den Herausgebern

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



www.e-mobilbw.de

e-mobil BW GmbH

Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und
Automotive Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49
info@e-mobilbw.de