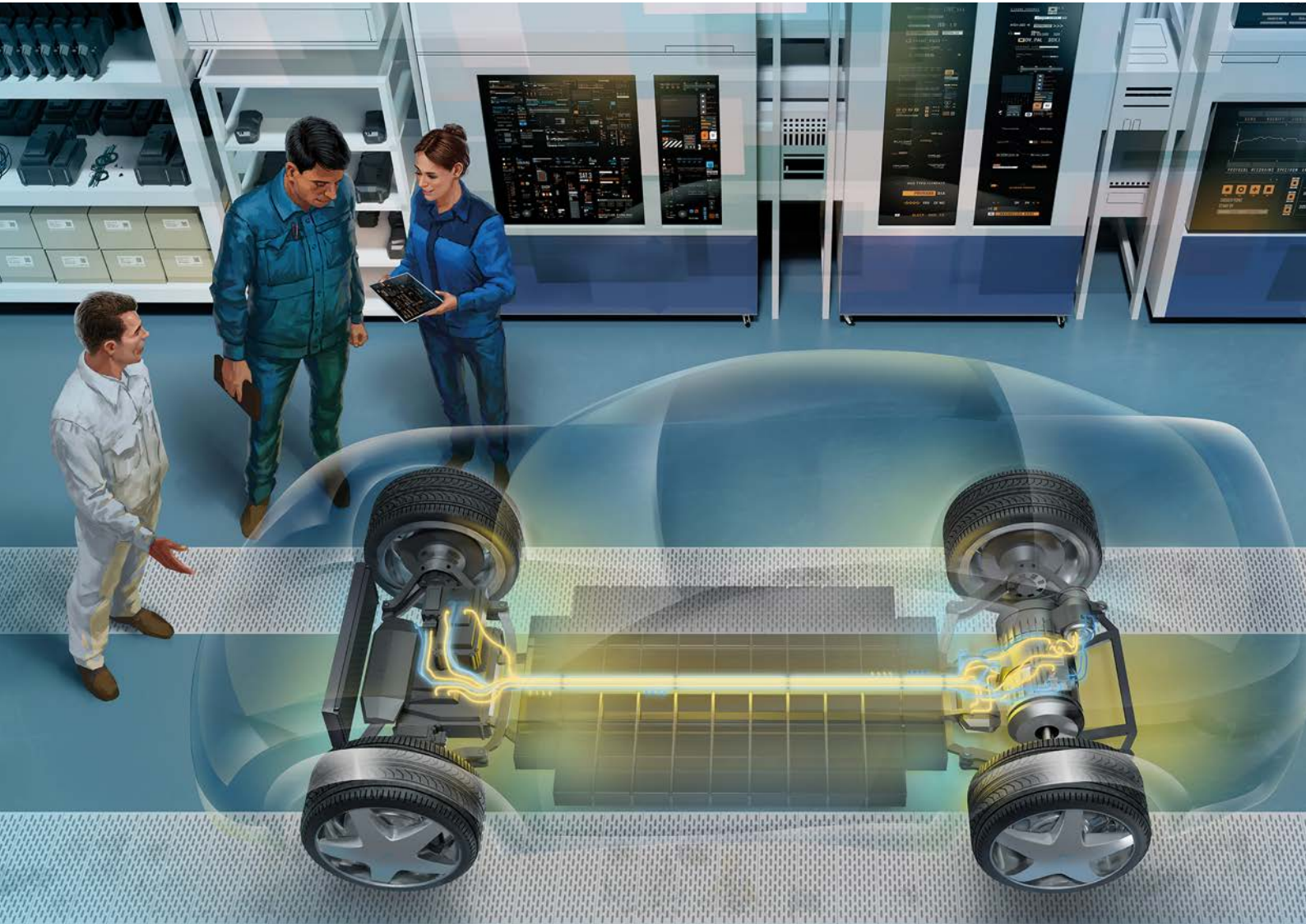


SCALE-UP E-DRIVE



Transformations-Factsheet "Technologische Trends E-Motor"

AUSGABE 2, SEPTEMBER 2023

Autoren:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. – Institut für Fahrzeugkonzepte
Samuel Hasselwander, Benjamin Frieske, Hagen Spielmann, Christian Ulrich

RWTH Aachen PEM – Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components
Michael Nankemann

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

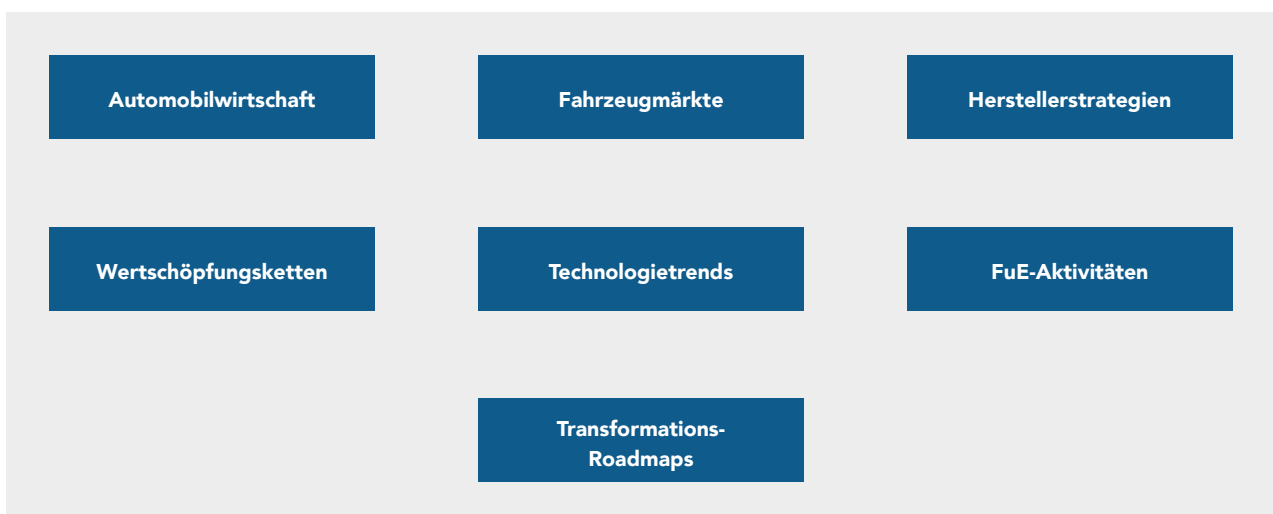
Hintergrund

Der Transformations-Hub „Scale-up E-Drive“ unterstützt insbesondere kleine und mittlere Unternehmen der Automobilwirtschaft in Deutschland bei der Transformation hin zu elektrifizierten Antriebssträngen, indem relevante Trends und Entwicklungen zu Branchen-, Markt-, Technologie-, Produkt- und Produktionswissen aufbereitet, in den internationalen Kontext eingeordnet und in Form von Transformations-Factsheets und -Dashboards bereitgestellt werden.

Diese Informationen bereiten die wesentlichen Entwicklungen im Zuge der Transformation des Antriebsstrangs zielgruppengerecht in kompakter Form auf und dienen der Unterstützung strategischer Entscheidungsprozesse in den Unternehmen. Übergeordnetes Ziel ist die Erhaltung von Innovations- und technologischer Wettbewerbsfähigkeit, um Wertschöpfung und Beschäftigung auch bei den neuen Produkten und Technologien des Antriebsstrangs in Deutschland zu sichern.

Der Hub fokussiert sich auf folgende Komponenten im Antriebsstrang: E-Motor, Leistungselektronik, Getriebe, Energie- und Thermomanagement, Integration von Batterien und Brennstoffzellen. Dabei stehen unterschiedliche Fahrzeugtypen im Zentrum der Betrachtung.

Entwicklungen und Trends mit Fokus auf den in Abbildung 1 dargestellten Themenschwerpunkten werden kontinuierlich im Laufe des Projekts in Form von Transformations-Factsheets und -Dashboards aufbereitet.



Quelle: DLR

Abbildung 1: Themenschwerpunkte der Transformations-Factsheets und -Dashboards

Das Dashboard (siehe Abbildung 3) ist, wie in Abbildung 2 dargestellt, im Bereich „Technologietrends“ angesiedelt und stellt relevante Kennzahlen und Entwicklungen für die verschiedenen aktuell im Pkw-Bereich eingesetzten Typen elektrischer Motoren dar: Permanentmagnet-Synchronmotor (PSM), fremd-

erregter Synchronmotor (FSM) und Asynchronmotor (ASM). Aufgrund der weiten Verbreitung der Begriffe E-Motor und E-Maschine werden diese als Synonyme für den Begriff elektrische Maschine verwendet. Im Rahmen dieses Factsheets wird der Begriff E-Motor verwendet.

Automobilwirtschaft	Umsatz	Produktion	Import/Export	Wirtschaftsleistung	Beschäftigung	Investitionen	
Fahrzeugmärkte	NZL HEV/EV	Bestand HEV/EV	Ladeinfrastruktur	Pol. Rahmen	DE/EU	USA	Asien
Herstellerstrategien	Ziele	Innovationsstrategien	Modellportfolios	Fzg.-Plattformen	Produktionsstandorte		
Wertschöpfungsketten	GeoMaps	Produktionsnetzwerke	Komponentenabhängigkeiten	Akteure und Lücken	Wertschöpfungsstrukturen		
Technologietrends	E-Motor	Leistungselektronik	Getriebe	Energie- und Thermomanagement	Integration Batterie/Brennstoffzelle		
FuE-Aktivitäten	Top 10	Patentanalyse	Innovationsdynamik	FuE-Schwerpunkte	Nationale Akteure		
Transformations-Roadmaps	TRL	MRL	Entwicklungspfade	Roadmapping	Technologieentwicklung	Delphi	

Quelle: DLR

Abbildung 2: Fokusthemen der Dashboard-Publikationsreihe

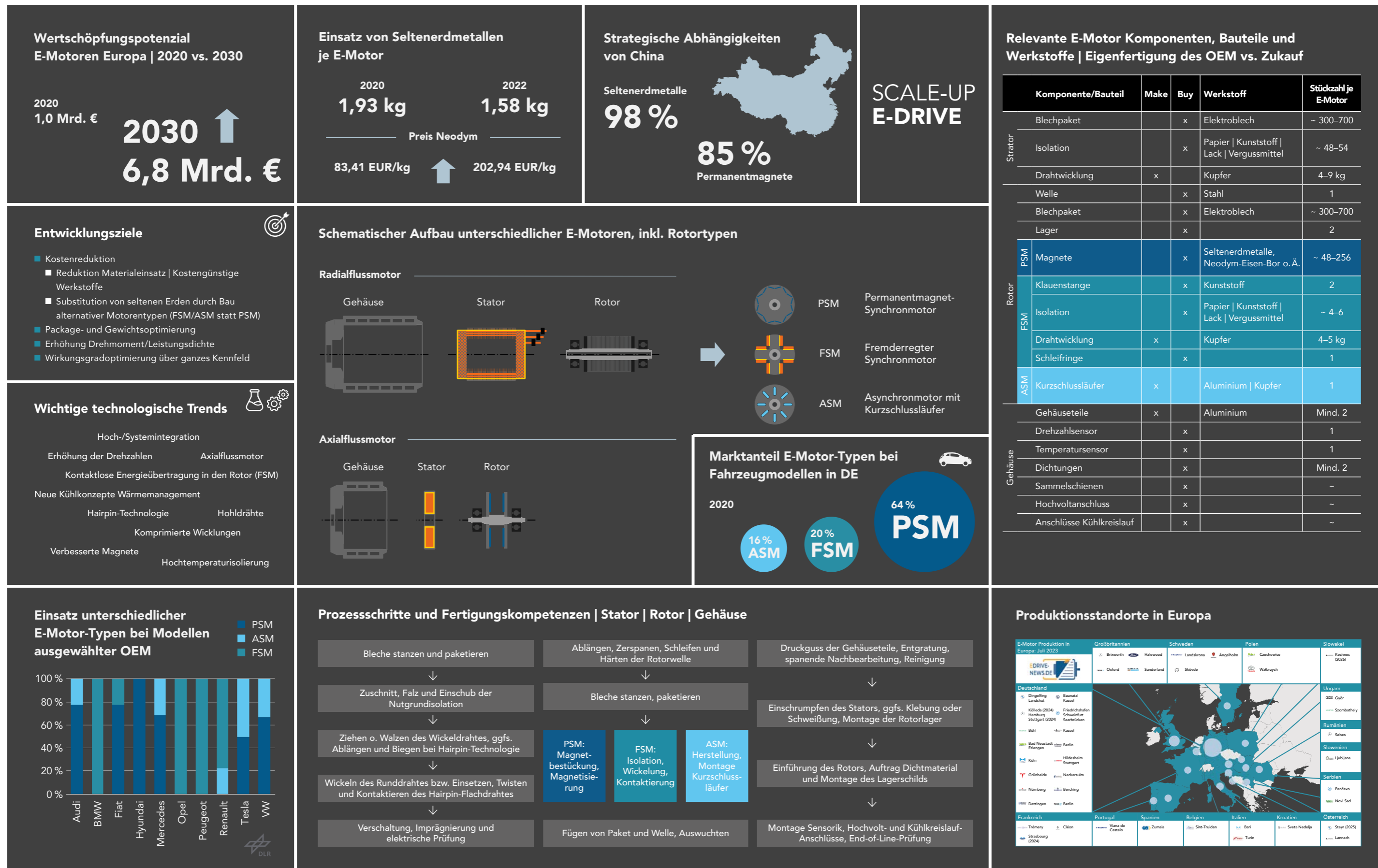


Abbildung 3: Transformations-Dashboard „Technologische Trends E-Motor“

Kontakt: benjamin.frieske@dlr.de, Quellen: A2Mac1 (2023), ADAC (2023), e-mobil BW (2020, 2021), Frieske et al. (2023), KBA (2021, 2022), PEM (2023a, 2023b)

Einleitung und Übersicht

Die Nachfrage nach elektrifizierten Fahrzeugen wird durch zukünftig immer strengere Emissionsgrenzwerte und Umweltauflagen weiter ansteigen. Im Zuge dieser fortschreitenden Elektrifizierung des Fahrzeugmarkts wird auch die Bedeutung von elektrischen Maschinen, die u. a. batterieelektrischen Fahrzeugen als Traktionsmotor dienen, zunehmen. Dies zeigt sich in der Entwicklung des zukünftigen Umsatz- bzw. Wertschöpfungspotenzials dieser Komponente: In Abhängigkeit von den zu erwartenden Neuzulassungszahlen elektrifizierter Fahrzeuge wird allein auf dem europäischen Markt, dargestellt in Abbildung 4, von einem starken Zuwachs der Nettowertschöpfung (ohne Margen und Steuern) von ca. 1,0 Mrd. EUR im Jahr 2020 auf ca. 6,8 Mrd. EUR im Jahr 2030 ausgegangen (Frieske et al., 2023).

Kombiniert mit einem Untersetzungsgetriebe ersetzen E-Motoren den Verbrennungsmotor konventioneller Fahrzeuge und dienen zum Beispiel bei batterieelektrischen Fahrzeugen zum einen als Antriebsmotor, zum anderen ermöglichen sie im Generatorbetrieb die Rückgewinnung von Energie bei Verzögerung des Fahrzeugs (Rekuperation). Die Herstellung der E-Motoren ist mit weniger Bauteil- und Personalaufwand verbunden als die Herstellung von Verbrennungsmotoren und erfolgt aktuell meist entweder direkt bei den Fahrzeugherstellern selbst oder bei Tier-1-Zulieferern. Solche industriell und hochgradig automatisiert hergestellten Traktionsmotoren für reine Elektrofahrzeuge kosten in der Herstellung je nach eingesetztem Motortyp zwischen 500 und 800 EUR (e-mobil BW, 2021).



Abbildung 4: Wertschöpfungspotenzial E-Motoren für den europäischen Markt

Funktionsweise

Im Pkw-Bereich haben sich mittlerweile drei verschiedene Motortypen etabliert:

- Permanentmagnet-Synchronmotor (PSM)
- Fremderregter Synchronmotor (FSM)
- Asynchronmotor (ASM)

Dabei kristallisierte sich in den letzten Jahren ein Trend zum PSM heraus, wie die Analyse verbauter E-Motor-Typen bei batterieelektrischen Fahrzeugmodellen bis 2022 in Abbildung 5 zeigt (ADAC, 2023). Dies liegt unter anderem an den hohen Effizienzen des PSM im mittleren Drehzahlbereich. Aber auch

an der im Vergleich zu den anderen Motoren in den meisten Arbeitspunkten höheren Leistungsdichte (e-mobil BW, 2021).

Das aus dem dreiphasigen Wechselstrom in den Spulenwicklungen des Stators resultierende Drehmagnetfeld zieht die im Rotor fest verbauten Permanentmagnete des PSM an und sorgt so für die Rotationsbewegung. Der Rotor dreht sich synchron mit dem Magnetfeld des Stators. Da für die Herstellung von Permanentmagneten allerdings Seltenerdmaterialien wie Neodym und Dysprosium benötigt werden, liegen die Herstellungskosten über denen von FSM und ASM. Diese kommen ohne die Verwendung von Permanentmagneten aus. Bei fremd- oder stromerregten Synchronmotoren wird das Magnetfeld des Rotors über die elektrische Erregung von Spulen-

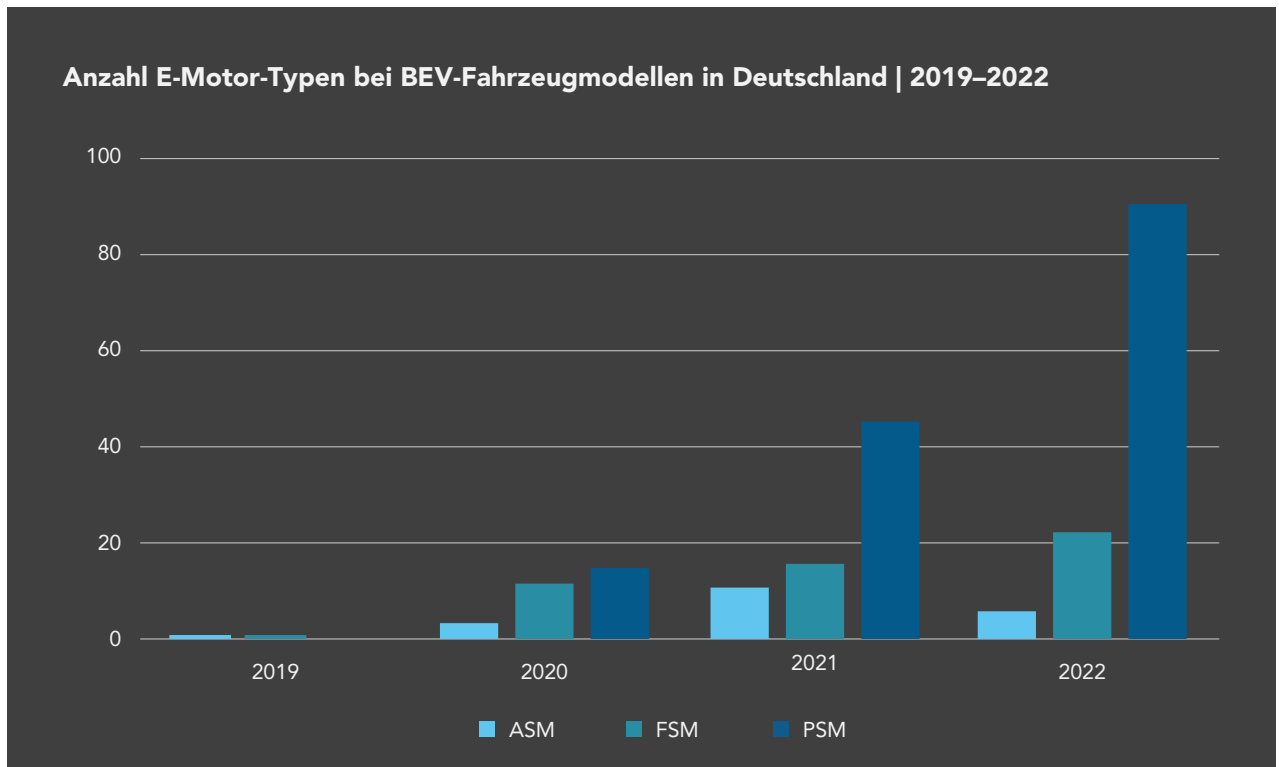


Abbildung 5: Anzahl E-Motor-Typen bei batterieelektrischen Fahrzeugmodellen in Deutschland von 2019 bis 2022

wicklungen im Rotor erzeugt. Bei dem Asynchronmotor erzeugt das Statorfeld einen Stromfluss im Kurzschlusskäfig des Rotors, wodurch ebenfalls ein Magnetfeld induziert wird. Dies erfolgt allerdings leicht verzögert, wodurch der Rotor dem Magnetfeld des Stators nachläuft. Die Rotation der Motorwelle erfolgt dementsprechend asynchron zum Drehfeld des Stators. Abbildung 6 zeigt schematisch den Aufbau der unterschiedlichen Motortypen.

Der Aufbau des Stators ist für alle drei elektrischen Motoren vergleichsweise ähnlich. Sie unterscheiden sich vor allem im Aufbau und in den Komponenten des Rotors. Die stromdurchflossenen Rotoren von FSM und ASM weisen im Unterschied zu Rotoren mit Permanentmagneten Rotor-/Erregerverluste auf und müssen daher meist zusätzlich zu den Statorwicklungen gekühlt werden. Durch die komplexere Rotorbauweise steigt das Format des Motors, woraus sich eine geringere Leistungsdichte ergibt.

Den kompaktesten E-Motor bildet der Axialflussmotor, bei dem das Magnetfeld nicht radial, sondern axial zur Rotorachse verläuft, woraus ein hohes Drehmoment und eine hohe Leistungsdichte resultieren. Der Rotor des Axialflussmotors ist ebenfalls mit Permanentmagneten bestückt, braucht aber aufgrund der axialen Bauweise weniger Magnetmaterial, und der Stator benötigt weniger Wickeldraht als bei einem PSM. Die Dauerleistungen sind allerdings mit Radialflussmotoren vergleichbar (Gerd Stegmaier, 2021). Bislang bestehen noch Herausforderungen aufgrund hoher Magnettemperaturen sowie einer aufwändigeren Leistungselektronik (Kleimaier, 2023). Daher und aufgrund des komplexeren Aufbaus des Axialflussmotors sowie dessen aktuell noch geringerer mechanischer Haltbarkeit befindet sich der Axialflussmotor nicht in der Serienanwendung im Volumensegment. Da der Markt der batterieelektrischen Fahrzeuge zurzeit von Radialflussmotoren geprägt ist, fokussiert das Dashboard die technologischen Trends und Entwicklungen dieses Motortyps.

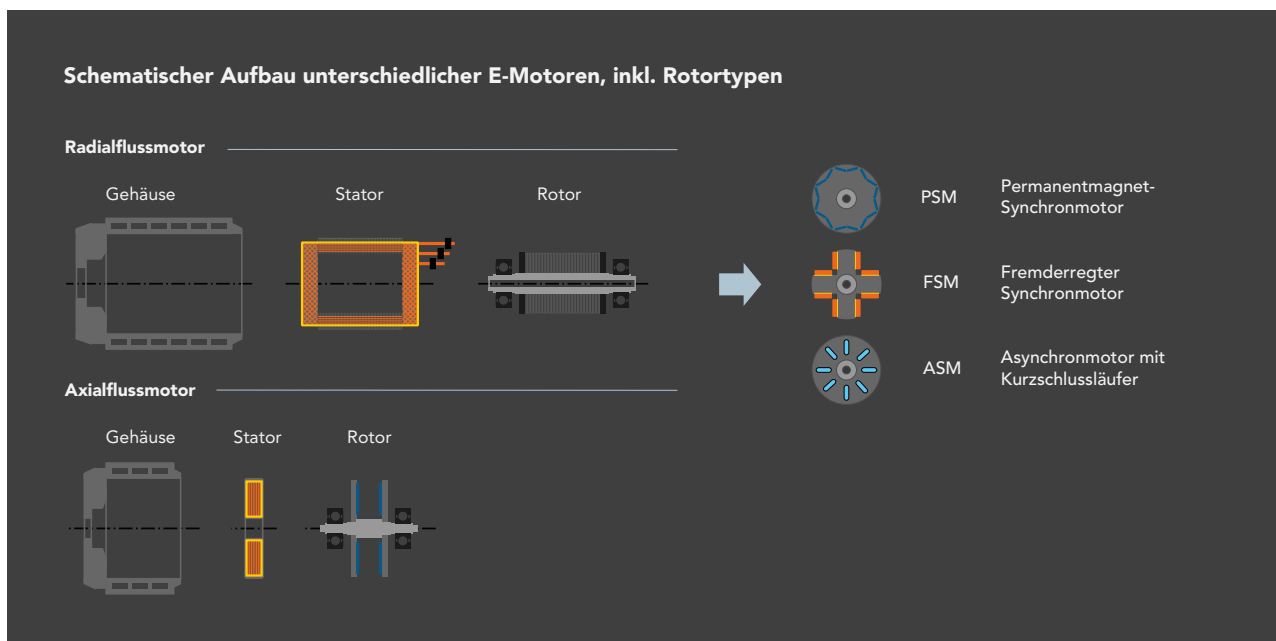
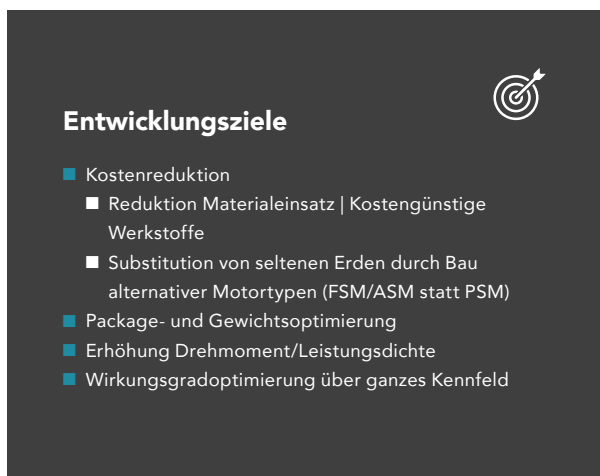


Abbildung 6: Schematischer Aufbau unterschiedlicher E-Motoren, inkl. Rotortypen

Technologie, Trends und Entwicklung

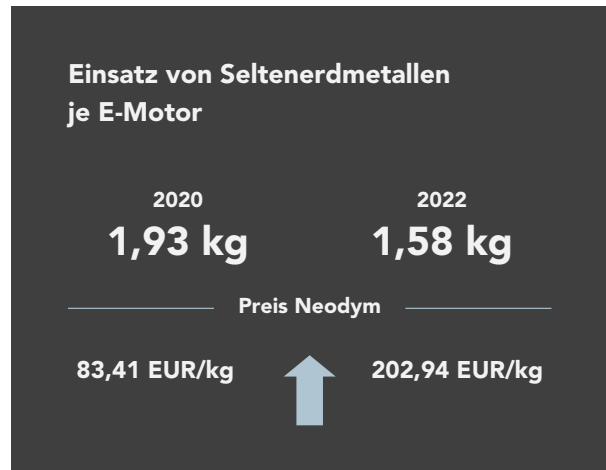
Abbildung 7 zeigt die Entwicklungsziele bei elektrischen Motoren. Diese sind aktuell stark kostengetrieben. So wollen viele Hersteller durch verbesserte Magnete und eine effizientere Ausrichtung den Materialeinsatz teurer Werkstoffe wie Neodym reduzieren. Ein typischer PSM für ein batterieelektrisches Fahrzeug mit 150 kW Spitzenleistung benötigt zwischen 1,5 und 2,5 kg Magnetmaterial (A2Mac1, 2023). Der Preis für Neodym, dargestellt in Abbildung 8, hat sich zwischen 2020 und 2022 im Jahresmittel auf 203 EUR/kg mehr als verdoppelt (Osmium-Institut, 2023). Bei einem Anteil von bis zu 35% Neodym pro Magnet fallen so hinsichtlich des Seltenerdmetalls Materialkosten von bis zu 175 EUR an (BVI Magnet GmbH, 2023).



Quelle: DLR

Abbildung 7: Entwicklungsziele bei elektrischen Motoren

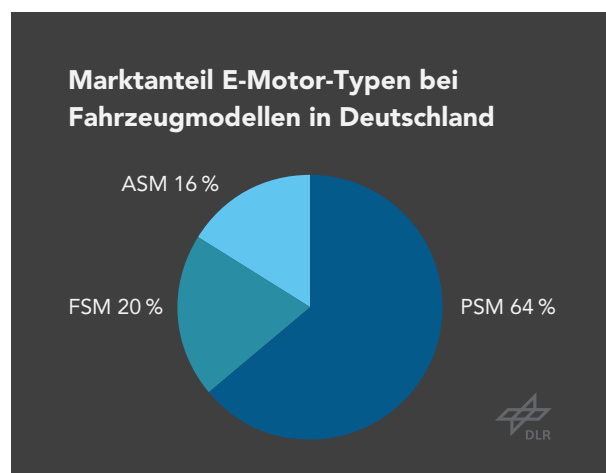
Seltenerdmetalle werden fast ausschließlich aus China an die EU geliefert. Ein Umstieg auf einen Motortyp, der gänzlich ohne Magnete auskommt, ermöglicht die komplette Substitution von Seltenerdmetallen, spart Materialkosten ein und vermindert darüber hinaus Lieferkettenabhängigkeiten.



Quelle: Quelle: A2Mac1, 2023; Osmium-Institut, 2023

Abbildung 8: Einsatz von Seltenerdmetallen je E-Motor

E-Motoren im Pkw-Sektor sollen aber vor allem klein und möglichst leicht sein. Daher fällt die Wahl der Fahrzeughersteller aufgrund der höheren Leistungsdichte überwiegend auf den PSM. Dieser macht derzeit einen Marktanteil von 64% an allen verbauten E-Motoren der aktuell in Deutschland verfügbaren Fahrzeugmodelle aus (siehe Abbildung 9). Dabei verfolgen die Hersteller unterschiedliche Strategien, was den Bezug und die Produktion von Elektromotoren angeht.



Quelle: Eigene Auswertung auf Basis von ADAC, 2023; KBA, 2021, 2022

Abbildung 9: Marktanteil E-Motor-Typen bei Fahrzeugmodellen in Deutschland

BMW hat beispielsweise schon früh mit der Eigenfertigung von fremderregten Synchronmotoren angefangen, während VW und Audi wie in Abbildung 10 dargestellt vornehmlich auf permanenterregte Motoren setzen und bei Allradmodellen zusätzlich einen Asynchronmotor verbauen (ADAC, 2023; KBA, 2021, 2022). Im Gegensatz dazu beziehen Mercedes, Fiat, Peugeot und Opel die Traktionsmotoren derzeit hauptsächlich von Tier-1-Zulieferern wie ZF, Valeo, Vitesco oder GKN Automotive (Marklines, 2023).

Insgesamt ist jedoch ein Trend zu einer zukünftig stärkeren vertikalen Integration der E-Motoren-Produktion bei Automobilherstellern zu erkennen. So werden beispielsweise ab 2023 zukünftige E-Motoren für Fahrzeuge des Stellantis Konzerns

(zum Beispiel Opel Mokka-e, Peugeot e-208, Jeep Avenger) erstmals in Eigenproduktion hergestellt und im ehemaligen Diesel-Werk Trémery vom Joint Venture „Nidec PSA emotors“ produziert (Stellantis, 2022).

Die E-Motoren für elektrische Pkw haben meist eine Spitzenleistung im Bereich von 100 bis 150 kW und wiegen je nach Motortyp ca. 35–75 kg (A2Mac1, 2023). Performance-orientierte Fahrzeuge werden teilweise auch mit E-Motoren mit bis zu 250 kW Spitzenleistung ausgestattet. Zusätzlich erfolgt zur weiteren Leistungssteigerung des Fahrzeugs oftmals auch die Integration eines zweiten E-Motors auf der noch unangetriebenen Achse. Fahrzeugmodelle mit zwei oder mehr E-Motoren sind allerdings derzeit erst ab dem Mittelklassesegment vorzufinden.

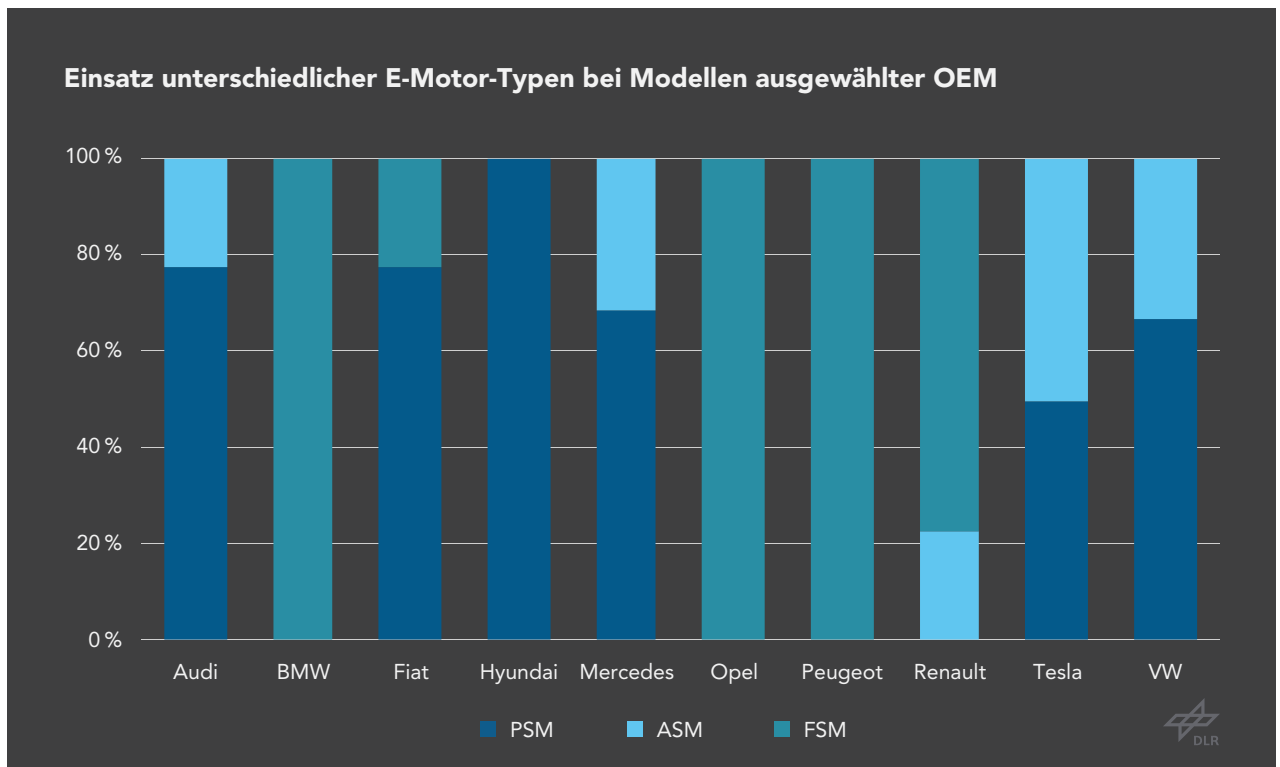


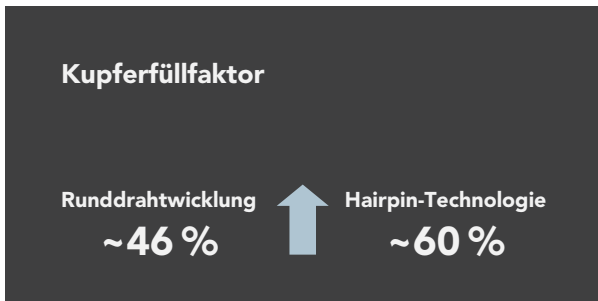
Abbildung 10: Einsatz E-Motor-Typen bei Modellen ausgewählter OEM

Abbildung 11 stellt die aktuell wichtigsten technologischen Trends dar. Die Hersteller versuchen, durch eine Hoch-/Systemintegration von E-Maschine, Getriebe, Leistungselektronik und Kühlkreislauf Kosten sowie Antriebsstrangverluste zu reduzieren und gleichzeitig Produktionsprozesse zusammenzufassen. Die daraus resultierenden verkürzten Kabelwege und Stromschienen führen neben Kosteneinsparungen auch zur Reduktion von elektromagnetischen Störungen und Spannungsüberschwingern. Bei solch einer Vollintegration wird zudem die Leistungsdichte des Antriebssystems deutlich gesteigert (emobil BW, 2021).



Abbildung 11: Technologische Trends der E-Maschinen-Entwicklung

Eine effizientere Kühlung durch neuartige Konzepte wie die direkte Kühlung der stromdurchflossenen Leiterspulen im Stator mittels Kühlschlitzen an den Wicklungen (Slot-Kühlung) oder durch Einbringung des Kühlmittels über Hohldrähte ermöglicht bei gleichbleibender Spitzenleistung eine Erhöhung der Dauerleistung des Motors. Die Kühlung des Rotors ist aufgrund der Erregerverluste vor allem bei stromdurchflossenen Rotoren (FSM und ASM) notwendig und kann über eine Rotorinnenkühlung oder durch Kühlkanäle direkt an den Wicklungen erfolgen (Pfund, 2022). Im Falle von Motoren mit Permanentmagneten kann es bei Überschreitung der Einsatztemperatur der eingesetzten Magnete (ca. 80 bis 200 °C, je nach Magnetzusammensetzung) zur Entmagnetisierung kommen (BVI Magnet GmbH, 2023). Deshalb ist auch beim PSM der Einsatz einer Rotorkühlung möglich, wie zum Beispiel MAHLE mit einem neu entwickelten „Superior Continuous Torque“-E-Motor gezeigt hat. Dieser erreicht eine Dauerleistung von über 90% der Spitzenleistung (MAHLE, 2022). Neben einer stärkeren Ausnutzung der Überlastfähigkeit des E-Motors und der daraus resultierenden höheren Leistungsdichte liegt der Fokus der Entwicklungen auch auf einer Erhöhung des Wirkungsgrads über das gesamte Effizienzkennfeld des Motors hinweg.



Quelle: Volkswagen Group Components, 2021

Abbildung 12: Vergleich des Kupferfüllfaktors eines E-Motors mit Runddrahtwicklung und mit Hairpin-Technologie

Die je nach Auslegung und vor allem im Stadtbetrieb vorkommenden Eisenverluste im Stator lassen sich beispielsweise durch Glühen der Statorbleche verringern. Dabei werden Gefügedefekte ausgeheilt, wodurch die spezifischen Verluste bei der Magnetisierung reduziert werden. Weiterhin lässt sich durch eine vollflächige Verklebung der Statorbleche die Isolation der Bleche zueinander verbessern, was zur Verminderung der Eisenverluste führt und ebenfalls eine präzise Positionierung der Bleche gewährleistet (Pfund, 2022). In Betriebszuständen der hohen Leistungs- und Drehmomentanforderung, zum Beispiel bei schnellen Beschleunigungsvorgängen, überwiegen die Kupferverluste in den Wicklungen des Stators. Durch die Verwendung von Flachdrähten – sogenannten Hairpin-Wicklungen, die den Kupferfüllfaktor des Stators erhöhen (siehe Abbildung 12) – anstatt von Runddrähten können die Kupferverluste verringert und somit die Effizienz und die Leistungsdichte des Motors erhöht werden (Volkswagen Group Components, 2021). Eine weitere Optimierung der Hairpin-Technologie stellt die „Continuous Hairpin“-Wicklung dar. Durch den bei diesem Prozess kontinuierlichen Wickelvorgang des Flachdrahts fällt die aktuell notwendige Kontaktierung (Verschweißung) der Hairpin-Drähte an den Wickelköpfen weg. Auf diese Weise reduziert sich der Kupferbedarf des Stators weiter. Um mit Runddrähten einen vergleichbaren Kupferfüllfaktor zu erreichen, können diese bei der Wicklung komprimiert werden.

Dadurch ließen sich bei niedrigeren Produktionskosten höhere Produktionsstückzahlen erzielen als bei der aufwändigeren Verarbeitung von Flachdrähten. Es gibt bei der Technologie der komprimierten Wicklungen allerdings noch Herausforderungen hinsichtlich der Prozesssicherheit sowie die Gefahr, dass die Isolation beim Komprimieren beschädigt wird. Daher ist sie bisher als nicht marktreif zu bewerten (e-mobil BW, 2021).

Beim FSM können durch eine kontaktlose, induktive Energieübertragung in den Rotor Schleifringverluste eliminiert und ein verschleißfreier Betrieb des Motors realisiert werden. Gegenwärtig werden unterschiedliche Technologien entwickelt. Es gibt auf dem Markt bereits serienreife Motoren mit kontaktloser Energieübertragung (MAHLE, 2022). Axialflussmotoren wurden dagegen noch nicht in Pkw-Antriebssträngen eingesetzt. Dies liegt vor allem an einem noch fehlenden serientauglichen Fertigungskonzept und an bestehenden akustischen und schwingungstechnischen Herausforderungen (Pfund, 2022). Der Einsatz dieses Motortyps wird eher für Performance-Fahrzeuge und im Premiumsegment erwartet (e-mobil BW, 2021).

Relevante E-Motor-Komponenten, -Bauteile und -Werkstoffe Eigenfertigung des OEM vs. Zukauf						
	Komponente/Bauteil	Make	Buy	Werkstoff	Stückzahl je E-Motor	
Strator	Blechpaket		x	Elektroblech	~ 300–700	
	Isolation		x	Papier Kunststoff Lack Vergussmittel	~ 48–54	
	Drahtwicklung	x		Kupfer	4–9 kg	
Rotor	Welle		x	Stahl	1	
	Blechpaket		x	Elektroblech	~ 300–700	
	Lager		x		2	
	PSM	Magnete		x	Seltenerdmetalle, Neodym-Eisen-Bor o. Ä.	~ 48–256
	FSM	Klauenstange		x	Kunststoff	2
		Isolation		x	Papier Kunststoff Lack Vergussmittel	~ 4–6
		Drahtwicklung	x		Kupfer	4–5 kg
		Schleifringe		x		1
	ASM	Kurzschlussläufer	x		Aluminium Kupfer	1
	Gehäuse	Gehäuseteile	x		Aluminium	Mind. 2
Drehzahlsensor			x		1	
Temperatursensor			x		1	
Dichtungen			x		Mind. 2	
Sammelschienen			x		~	
Hochvoltanschluss			x		~	
Anschlüsse Kühlkreislauf			x		~	

Quelle: A2Mac1, 2023; e-mobil BW, 2020; Kampker et al., 2022

Tabelle 1: Relevante E-Motor-Komponenten, Bauteile und Werkstoffe

Komponenten, Produktion und Fertigungskompetenzen

Zwar werden für die Herstellung eines E-Motors deutlich weniger einzelne Bauteile benötigt als für einen Verbrennungsmotor, dennoch gibt es auch hier viele Komponenten und Bauteile, die von OEM oder Tier-1-Zulieferern derzeit zugekauft werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die relevanten Komponenten, Bauteile und Werkstoffe.

Insbesondere die Drahtwicklungen in Stator und Rotor, Gehäuse-seiteile sowie der Kurzschlusskäfig des ASM werden von Automobilherstellern und Tier-1-Zulieferern selbst gefertigt. Bei allen weiteren Bauteilen besteht auch für KMU Potenzial einer Zulieferung, mit zum Teil hohen Stückzahlen je E-Motor (A2Mac1, 2023; e-mobil BW, 2020; Kampker et al., 2022).

So werden beispielsweise pro Stator 300 bis 700 Bleche benötigt. Diese müssen geschnitten, gestapelt und paketi-ert werden – Produktionsschritte, die typischerweise von Tier-2-Unternehmen durchgeführt werden. Abbildung 14 fasst die wichtigsten Prozessschritte und Fertigungskompetenzen zusammen. Je nach Motortyp und -leistung werden 4 bis 9 kg Kupferdraht für die Wicklungen des Stators benötigt. Hier erfolgt die Wicklung meist „inhouse“ bei den Motorenherstellern. Die Nutgrundisolation zur Isolation der Kupferwicklungen gegenüber dem Statorpaket wird meist über Isolationspapier realisiert, das zugeschnitten, umgeformt und eingesetzt wird. Im Anschluss wird die Wicklung zur besseren Wärmeleitfähigkeit mit einem speziellen Vergussmittel ausgegossen.

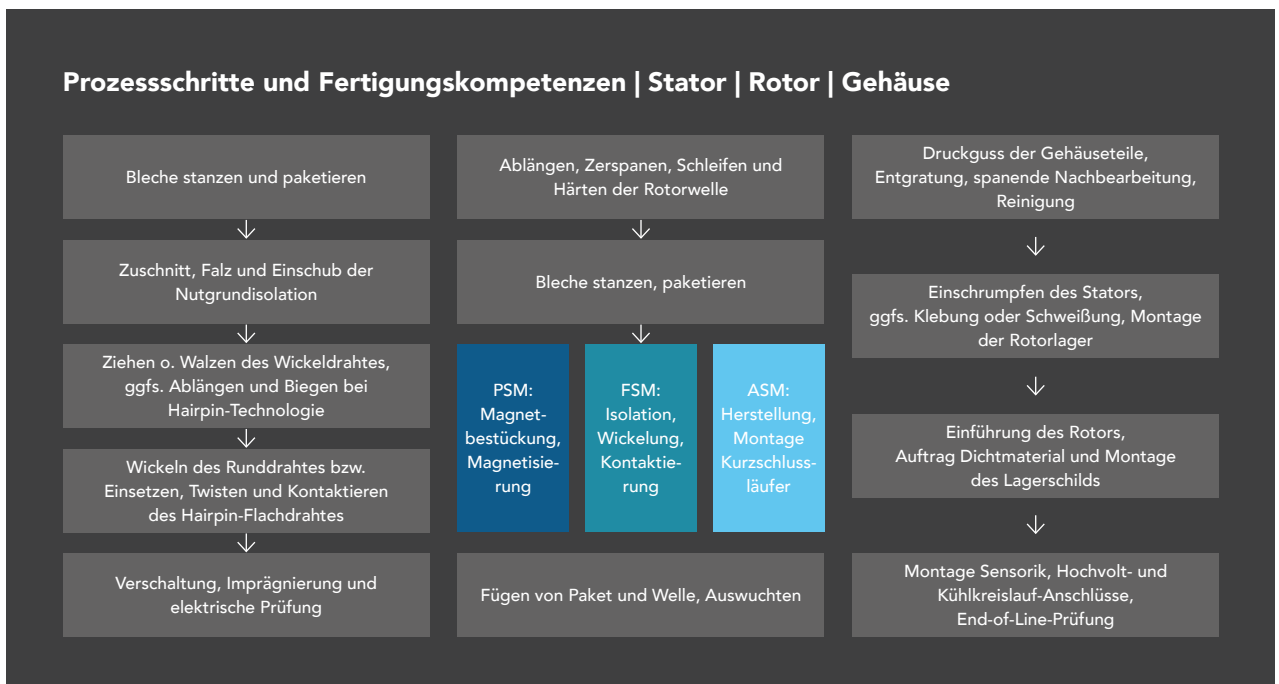


Abbildung 13: Prozessschritte und Fertigungskompetenzen bei der Produktion von E-Maschinen

Die Rotorwelle wird zur Gewichtseinsparung meist als Hohlwelle ausgeführt und dient der Übertragung des Drehmoments vom Blechpaket zum Getriebe. Sie kann über spanende Bearbeitung oder aus Kombination umformender und spanender Prozesse hergestellt werden. Aufgrund der hohen Motordrehzahlen und des geringen Luftspalts zwischen Rotor und Stator gelten strenge Toleranzen hinsichtlich der Koaxialität und der Oberflächengüte der Welle. Die Welle wird meist über eine zylindrische Presspassung oder eine formschlüssige Verbindung mit dem Blechpaket verbunden. Je nach Motortyp unterscheidet sich der Rotoraufbau, dargestellt in Abbildung 14, der grundsätzlich auch aus einem Blechpaket zusammengesetzt ist. Er differenziert sich je nach Motortyp und wird entweder mit Magneten versehen und verklebt (PSM), mit Isolation und Drahtwicklungen ausgerüstet (FSM) oder mittels Druckguss in die vorhandenen Rotornuten des Blechpakets mit einem Kurzschlussläufer bestückt (ASM) (PEM, 2023b).

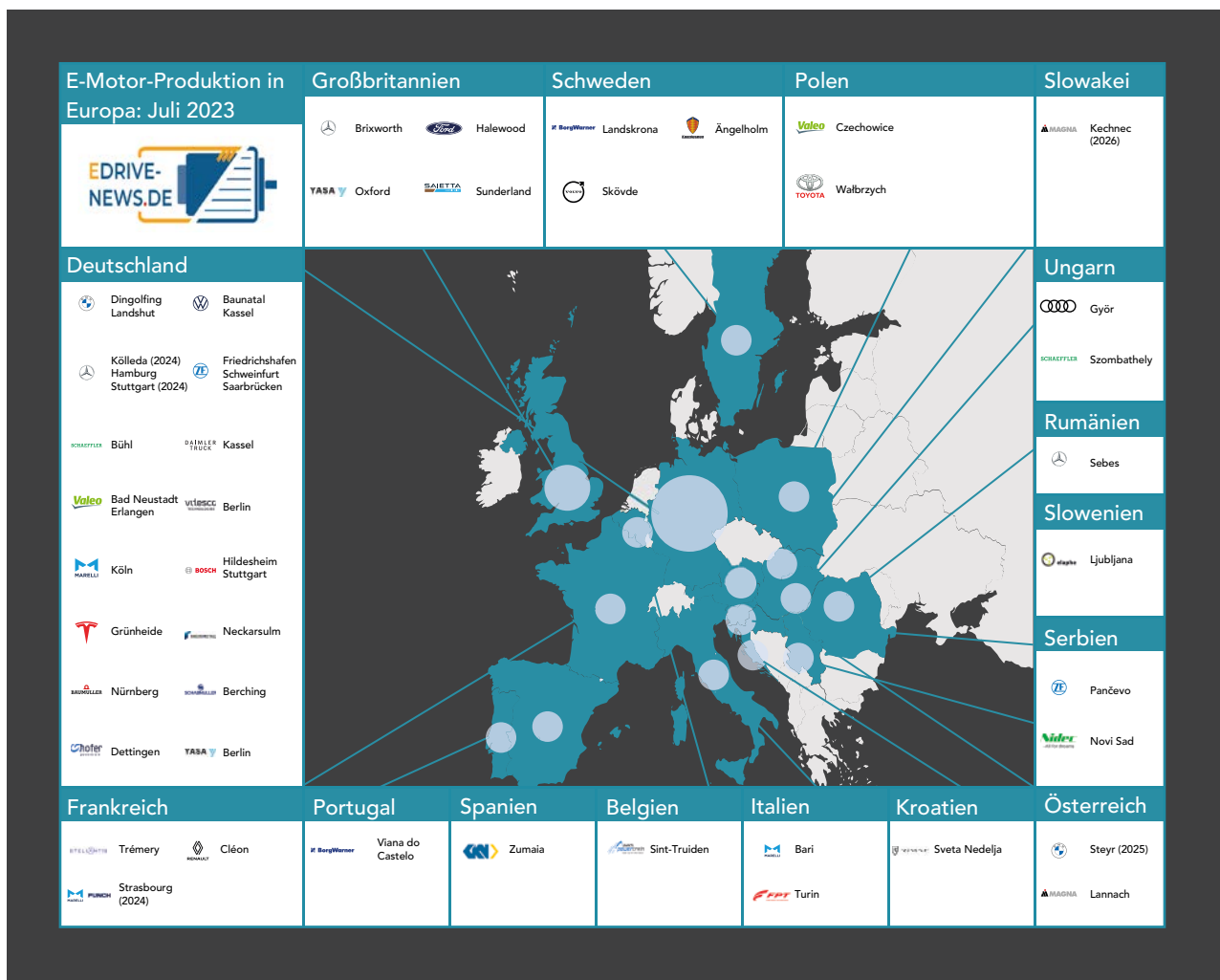
Das Gehäuse wird meist aus Aluminium im Druckgussverfahren und durch spanende Nachbearbeitung hergestellt. Es nimmt den Stator sowie die Rotorlager auf. Der Stator wird dabei meist durch Warmschrumpfen unter Erwärmung des Gehäuses gefügt und in die Lager eingepresst (e-mobil BW, 2020; Kampker et al., 2022). Anschließend muss der Rotor eingefügt werden, ohne mit dem Stator zu kollidieren. Gerade beim Einsetzen eines Rotors mit Permanentmagneten können hohe Kräfte wirken, sodass dieser Prozess meist vollautomatisch mit einer möglichst steifen Montagevorrichtung erfolgt. Anschließend können die Sensoren montiert werden. Meist handelt es sich hier um einen Drehzahl- sowie einen Temperatursensor pro Motor. Daraufhin erfolgen der Auftrag von Dichtmaterial und die Montage des Lagerschilds. Dabei können Lagerschild und Getriebegehäuse bei einem integrierten E-Motor auch ein gemeinsames Bauteil sein. Abschließend erfolgen der Anschluss des Kühlkreislaufs sowie die Kontaktierung der Phasen.



Abbildung 14: Schematische Darstellung Rotor

Eine Vielzahl von Automobilherstellern und Zulieferern sind in Deutschland und Europa in der Forschung, Entwicklung und Produktion tätig. In Deutschland besitzen beispielsweise BMW (Dingolfing, Landshut), Daimler Truck (Kassel), Mercedes-Benz (Hamburg; zusätzlich Kölleda und Stuttgart ab 2024), Tesla (Grünheide) und Volkswagen (Baunatal, Kassel) eigene Werke zur Produktion und Montage von E-Motor-Komponenten. Ebenso sind Zulieferer wie zum Beispiel Baumüller (Nürnberg),

Bosch (Hildesheim, Stuttgart), hofer powertrain (Dettingen), Marelli (Köln), Rheinmetall (Neckarsulm), Schabmüller (Berching), Schäffler (Bühl), Valeo (Bad Neustadt, Erlangen), Vitesco (Berlin), Yasa (Berlin) und ZF (Friedrichshafen, Schweinfurt, Saarbrücken) aktiv (PEM, 2023a). Abbildung 15 stellt die verschiedenen europäischen Produktionsstandorte von E-Motoren graphisch dar.



Quelle: Quelle: PEM, 2023a

Abbildung 15: E-Motoren-Produktionsstandorte in Europa

Strategische Abhängigkeiten

Durch die Veränderung von Schlüsselkomponenten in einem zukünftig stärker elektrifizierten Fahrzeug ändern sich auch die zur Herstellung notwendigen Materialien und Ressourcen, sodass sich neue Zuliefererbeziehungen – und damit auch neue strategische Abhängigkeiten – für die deutsche und europäische Automobilindustrie ausbilden. Besonders hohe strategische Abhängigkeiten entstehen dort, wo für die Wettbewerbsfähigkeit relevante Schlüsselkomponenten betroffen sind und die Versorgung von wenigen – möglicherweise politisch instabileren – Weltregionen abhängig ist. Diese im Rahmen des Technologiewandels sogenannten kritischen Komponenten und deren Versorgungssituation (inkl. Materialien/Rohstoffe) werden nachfolgend für E-Motoren dargestellt (hier und im Folgenden: e-mobil BW, 2022):

Der Wertschöpfungsprozess kann generell in drei Kategorien untergliedert werden: Rohmaterialien, verarbeitete Materialien und Komponenten. Beim E-Motor ist die deutsche Automobilindustrie derzeit auf allen Wertschöpfungsstufen in hohem Maße von Fremdleistungen abhängig. Die Rohmaterialien zur Herstellung



Abbildung 16: Strategische Abhängigkeiten von China

eines Traktionsmotors umfassen für Permanentmagnete unter anderem Neodym, Dysprosium, Bor und Praseodym. Weitere Materialien sind Silizium (Halbleiter), Eisen (Gussteile, Magnete), Aluminium (Gussteile) und Kupfer (Wicklungen, Drähte). In Legierungen kommen ebenfalls Chrom und Molybdän (zum Beispiel zum Korrosionsschutz) zum Einsatz. Nur 1% aller genannten kritischen Rohmaterialien stammen aus dem europäischen Umfeld, sodass derzeit in erster Stufe der Wertschöpfungskette eine sehr hohe strategische Abhängigkeit von einzelnen Ländern und/oder Weltregionen gegeben ist. 89% der Rohstoffe werden in den Regionen Asien (74%), Südamerika (11%) und Afrika (4%) gefördert. China allein hat einen Anteil von 65% an der Gesamtmenge. Weitere 5% der kritischen Rohmaterialien stammen aus den USA. Bei Detailbetrachtung der Versorgungssituation für Seltenerdmetalle kann eine extreme Abhängigkeit erkannt werden: China ist hierbei für 98 bis 99% aller Lieferungen an die EU verantwortlich (European Commission, 2020). Ebenso dominiert China die zweite Stufe in der Wertschöpfungskette. Die hier verarbeiteten Materialien beziehen sich zum Beispiel auf die Herstellung der Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete, an denen China einen Anteil von ca. 85% der globalen Produktion besitzt (dargestellt in Abbildung 16). Darüber hinaus werden ca. 10% in Japan hergestellt. Auch die weiteren in dieser Wertschöpfungsstufe verarbeiteten Materialien – wie zum Beispiel bei Verbindungen und Gehäusen – hängen mit einem Anteil in Höhe von 55% von China ab. Zusätzlich kommen jeweils 4% aus Japan, den USA und Südamerika. Die EU hat in dieser Wertschöpfungsstufe einen Anteil von ca. 7%. In dritter Stufe der Wertschöpfungskette – bei den Komponenten – verschieben sich die strategischen Abhängigkeiten innerhalb des asiatischen Raums von China nach Japan. So stammen ca. 52% aller Traktionsmotoren aus Japan, nur weitere 15% aus China. Die USA liefern hier ca. 10% des weltweiten Anteils in die EU, die selbst für ca. 8% der E-Motoren-Produktion verantwortlich ist. Das Versorgungsrisiko in den Lieferketten für E-Motoren wird für die deutsche Automobilindustrie insbesondere bei Rohstoffen als hoch bewertet; bei den verarbeiteten Werkstoffen und Bauteilen sowie bei Komponenten als mäßig eingestuft.

Literatur

A2Mac1 (2023): Teardown data of xEV Powertrains.
Bill of Material Analysis.

ADAC (2023): Fahrzeugdatenbank. Technische Fahrzeugdaten
- Aktuelle Modelle ab Bj. 2019. Stand Januar 2023.

BVI Magnet GmbH (2023): NdFeB-Magnete
(Neodymmagnete). Online verfügbar unter <https://www.bvi-magnete.de/neodym-eisen-bor-magnete.php>, zuletzt geprüft am 03.07.2023.

e-mobil BW (Hrsg.) (2020): Wissen Kompakt. Produktion
elektrischer Traktionsmotoren.

e-mobil BW (Hrsg.) (2021): Wertschöpfungspotenziale von
E-Motoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg:
Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West. Stuttgart.

e-mobil BW (Hrsg.) (2022): Zukunftsfähige Lieferketten und
neue Wertschöpfungsstrukturen in der Automobilindustrie.
Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie_Zukunftsfae-hige_Lieferketten_und_neue_Wertschoepfungsstrukturen_in_der_Automobilindustrie.pdf, zuletzt geprüft am 04.07.2023.

European Commission (2020): Critical Raw Materials for
Strategic Technologies and Sectors in the EU – a foresight
study. Brüssel. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/doi/10.2873/58081>, zuletzt geprüft am 06.07.2023.

Frieske, B.; Hasselwander, S. (2023): Transformations-
Factsheet „Automobilwirtschaft“. https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Scale-up_E-Drive/23288_Scale-Up_E-Drive_-_Transformations-Factsheet_Automobilwirtschaft_RZ.pdf

Gerd Stegmaier (2021): Was bitte ist ein Axialflussmotor?
Elektrische AMG-Zukunft mit Yasa-Motor. Online verfügbar
unter <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mercedes-amg-elektromotoren-wie-ferrari-axialflussmotor-yasa/>, zuletzt geprüft am 14.08.2023.

Kampker, A.; Heimes, H. H.; Dorn, B. N.; Brans, F.; Nanke-
mann, M.; Backes, T. A.; Stäck, C.; Born, H. C.; Kraus, A.;
Dorantes Gomez, J. G. (2022): Elektromotoren Produktion.
Die Wertschöpfungskette im Spannungsfeld von „Market
Pull“ und „Technology Push“. Aachen. Online verfügbar unter
<https://publications.rwth-aachen.de/record/861860>, zuletzt
geprüft am 03.07.2023.

KBA (2021): Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und
Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern und Handelsnamen
(FZ 4). Jahr 2021. Online verfügbar unter
https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ4/fz4_2021.xlsx?jsessionid=8B2BDFD4B4E9B992D091599F31FC5225.live11312?blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 23.06.2023.

KBA (2022): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach
Marken und Modellreihen (FZ 10). Monatsergebnisse,
Dezember 2022. Online verfügbar unter
https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ10/fz10_2022_12.xlsx?blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 23.06.2023.

Kleimaier, A. (2023): Modulare Axialflussmaschine für hohes
Drehmoment. In: e & i Elektrotechnik und Informationstech-
nik, 140 (3-4), S. 366–374. <https://doi.org/10.1007/s00502-023-01133-5>.

MAHLE (2022): MAHLE entwickelt ausdauerstärksten
E-Motor. Online verfügbar unter <https://www.mahle.com/de/news-and-press/press-releases/mahle-entwickelt-ausdauerstarksten-e-motor-91264>, zuletzt geprüft am 03.07.2023.

Marklines (Hrsg.) (2023): Analysis Report: EV/HV Drive Motor (European Market).

Osmium-Institut (2023): Tagesaktueller Neodym-Preis.

Online verfügbar unter <http://www.neodym-preis.de/de/price/usd/12/daily/>, zuletzt geprüft am 06.07.2023.

PEM (Hrsg.) (2023a): E-Motor-Produktion in Europa: Juli 2023. Production Engineering of E-Mobility Components RWTH Aachen University.

PEM (Hrsg.) (2023b): Prozessübersicht E-Motorproduktion. Production Engineering of E-Mobility Components RWTH Aachen University.

Pfund, T. (2022): Efficient Scale-Up to Volume Production of Innovative Electric Motors and Power Electronics. Schaeffler Kolloquium 2022. Online verfügbar unter <https://www.schaeffler.com/en/media/dates-events/kolloquium/digital-conference-book-2022/edrive/>, zuletzt geprüft am 05.07.2023.

Stellantis (2022): Transformation in Action: Trémery-Metz Powertrain Plants in France Support Stellantis' Electrified Portfolio. Online verfügbar unter <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2022/june/transformation-in-action-tremery-metz-powertrain-plants-in-france-support-stellantis-electrified-portfolio>, zuletzt geprüft am 11.07.2023.

Volkswagen Group Components (2021): MEB Base+ technical highlights. Hairpin-Technology.

Hintergrund

Das Projekt „Transformations-Hub Scale-up E-Drive“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Mit dem Transformations-Hub Scale-up E-Drive werden insbesondere kleine und mittlere Unternehmen befähigt, neue Technologietrends aufzunehmen, geeignete Partner zu finden und sich neue Geschäftsfelder zu erschließen. Dafür wird der bundesweit agierende Hub vorwettbewerbliche und fachspezifische Inhalte vermitteln sowie neue Chancenfelder in Bezug auf den elektrischen Antriebsstrang aufzeigen und durch gezielte Vernetzung neue Kooperationen initiieren.

Die Publikationsreihe „Transformations-Factsheet“ bereitet aktuelle Trends und Entwicklungen zu Branchen-, Markt-, Technologie-, Produkt- und Produktionswissen in kompakter Form auf und ordnet diese in den internationalen Kontext ein.

SCALE-UP E-DRIVE

Herausgeber

Transformations-Hub Scale-up E-Drive
c/o e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-43
hub-edrive@e-mobilbw.de



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages