

Nutzfahrzeugmarkt Baden-Württemberg

Aktuelle Trends, Wertschöpfung und Chancen
für Zulieferer



Nutzfahrzeugmarkt Baden-Württemberg

Aktuelle Trends, Wertschöpfung und Chancen
für Zulieferer

Herausgeber

e-mobil ^{BW} 
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen
und Automotive Baden-Württemberg

Autoren



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	6
2	Management Summary	8
3	Einführung in die Nutzfahrzeugbranche in Baden-Württemberg	11
3.1	Makroökonomische Bedeutung der Nutzfahrzeugbranche in Baden-Württemberg	11
3.2	Analyse des Umwelteinflusses schwerer Nutzfahrzeuge	13
3.3	Identifikation übergeordneter Treiber der Antriebswende	13
4	Technologien der Antriebswende	17
4.1	Bottom-up-Technologie-Evaluation	17
4.1.1	Definition von Betriebsszenarien	17
4.1.2	Evaluation der zukünftigen Relevanz von Antriebstechnologien	18
4.2	Top-down-Szenario-Analyse	20
4.2.1	Szenarien für den Hochlauf alternativer Antriebstechnologien	20
4.2.2	Entwicklung des Gesamtbetriebskostenmodells	20
4.2.3	Auswertung des Gesamtbetriebskostenmodells	24
5	Wertschöpfungspotenziale in Baden-Württemberg	37
5.1	Strukturanalyse der Fahrzeugkonzepte	37
5.2	Kompetenzbedarfe zur Fertigung der Antriebsstränge	40
5.2.1	Verbrennungsmotorischer Antriebsstrang	40
5.2.2	Traktionsbatterie	43
5.2.3	E-Motor	51
5.2.4	Leistungselektronik	56
5.2.5	Brennstoffzellensysteme	63
5.2.6	Wasserstoff-Verbrennungsmotor	72
5.3	Kompetenz-Mapping	76
5.4	Kompetenzentwicklung und Kompetenzbedarf	80
5.4.1	Vorgehen der Gap-Analyse	80
5.4.2	Technologiespezifische Kompetenzgaps	80
5.4.3	Querschnittliche Handlungsfelder	83
5.5	Wertschöpfungsentwicklung	84
5.6	Synergieanalyse	86



6	Handlungsempfehlungen und strukturelle Voraussetzungen	90
6.1	Handlungsempfehlungen für die Transformation der Nutzfahrzeugbranche	90
6.2	Anforderungen an die lokalen, nationalen und europäischen Rahmenbedingungen	95
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	99
8	Anhang	102
8.1	Aufbau alternativer Antriebskonzepte und der notwendigen Infrastruktur	102
8.2	Erklärung zu generativer KI und KI-gestützten Technologien im Schreibprozess	108
8.3	Hinweis zur Quellenverwendung:	108
	Literaturverzeichnis	109
	Abkürzungsverzeichnis	115
	Tabellenverzeichnis	118

01

Vorwort

01

Vorwort

Die Transformation des Straßengüterverkehrs ist ein industrie- und gesellschaftspolitisches Schlüsselthema: Sie entscheidet über Klimawirkung, Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität. Mit der vorliegenden Studie legen wir eine integrierte Bewertung zentraler Antriebsoptionen für schwere Nutzfahrzeuge vor. Auf Basis einer Top-down-Szenario-Analyse und einer Bottom-up-Technologie-Evaluation verknüpfen wir Technik, Infrastruktur und „Total Cost of Ownership“ mit regionalen Wertschöpfungspotenzialen und Kompetenzbedarfen. So entsteht eine belastbare Grundlage für Investitionsentscheidungen, Infrastrukturplanung und industriepolitische Handlungsoptionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Wir danken allen Partnern für die konstruktive Zusammenarbeit und laden zum fachlichen Austausch über die Ergebnisse ein.

Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker &
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Heiner Heimes

02

Management Summary

02

Management Summary

In der Studie wird der Transformationspfad schwerer Nutzfahrzeuge hin zu emissionsarmen sowie emissionsfreien Antrieben analysiert und die wirtschaftliche Durchsetzungsfähigkeit zentraler Technologien anhand eines Modells zur „Total Cost of Ownership“ (TCO) bewertet. Als Untersuchungsrahmen werden konventionelle Dieselantriebe (ICET), batterieelektrische Lkw (BET), brennstoffzellelektrische Lkw (FCET) und wasserstoffverbrennende Lkw (H2-ICET) betrachtet. Methodisch wird in der Studie eine Top-down-Szenario-Analyse mit einer Bottom-up-Technologie-Evaluation kombiniert. Daraus resultieren eine Einordnung der Antriebskonzepte und der Infrastrukturanforderungen, eine Konkretisierung in Anwendungsszenarien und priorisierte Relevanzkriterien als Basis für eine Kosten- und Hochlaufbetrachtung. Ergänzend werden Fertigungskompetenzen und Wertschöpfungspotenziale untersucht, auf dieser Basis eine Gap-Analyse vorgenommen und schließlich Handlungsempfehlungen abgeleitet.

In der TCO-Analyse werden drei Hochlaufsznarien („Business as usual“, Batterie-Fokus und Wasserstoff-Fokus) in modellierbare Parameter überführt. Das Modell bildet Entwicklungen der Anschaffungskosten (CAPEX) sowie der Energiepreise und weiterer Betriebskostenkomponenten (OPEX) ab. Eine Sensitivitätsanalyse quantifiziert zudem den Einfluss zentraler Annahmen. In allen Szenarien zeigt sich: Der ICET verliert an Wettbewerbsfähigkeit, und „Zero Emission“-Trucks gewinnen. Nicht der Anschaffungspreis, sondern OPEX dominieren die TCO. Damit sind Energiepreise, Infrastrukturverfügbarkeit und regulatorische Rahmenbedingungen die entscheidenden Parameter. Da Energiekosten für alle Technologien den größten Kostenblock bedeuten, liegt hierin das größte wirtschaftliche Potenzial. Energiekosten sind der mit Abstand stärkste Treiber der Gesamtbetriebskosten, insbesondere bei wasserstoffbasierten Pfaden (in Abhängigkeit vom Wasserstoffpreis).

Als zweiter Einflusskanal wirken Maut- und Regulierungsparameter, die kurzfristig starke Kostenverschiebungen bewirken können. Unter den getroffenen Annahmen sind BET früh und robust wirtschaftlich: Ab 2026 sind sie die kostengünstigste Option in allen betrachteten Szenarien. FCET und H2-ICET erreichen Kostennähe zu BET nur dann, wenn CAPEX und insbesondere OPEX sinken. Im Wasserstoff-Fokus liegen sie ab 2029 rund fünf bis zehn Prozent über BET, was sie prinzipiell konkurrenzfähig macht, jedoch klare Voraussetzungen an Preis- und Skaleneffekte stellt. Wirtschaftlichkeit und Nutzbarkeit sind zudem stark vom Einsatzprofil abhängig: Hohe Depotladeanteile erhöhen den BET-Vorteil, fehlender Depotzugang erhöht die Abhängigkeit von öffentlicher Ladeinfrastruktur. Die Antriebswahl ist damit nicht allein eine Frage des Segments (Verteiler-, Linien- und Fernverkehr), sondern sie ist auch von operativen Rahmenbedingungen der Flotten geprägt.

Über die Kosten- und Marktperspektive hinaus werden in der Studie die Wertschöpfungspotenziale in Baden-Württemberg untersucht und daraus Defizite, Synergien und Handlungsoptionen abgeleitet. Dazu ist sie auf eine Stücklistenanalyse, die Ableitung von Bauteilstruktur, Fertigungsprozessen und Kostenanteilen, eine Betrachtung von Wertschöpfungstiefen und Prozessketten sowie eine Kompetenz-Gap-Analyse gestützt. Eine Synergie-Analyse bewertet Barrieren und Potenziale technologieparalleler Entwicklung. Inhaltlich zeigt sich eine Neuordnung der Wertschöpfung: Motor- und abgasnachbehandlungsnahe Anteile gehen zurück, während Batterie, Elektromotor, Leistungselektronik, Wasserstoffspeicher und Brennstoffzellensysteme an Bedeutung gewinnen. Für Baden-Württemberg ergibt sich daraus der strategische Auftrag, Stärken in Metallverarbeitung und Systemintegration zu überführen und zugleich Kompetenzen aufzubauen, die künftige Wertschöpfungsanteile adressieren: die Serienfertigung elektrochemischer Systeme, Präzisions- und Beschichtungstechnologien, Halbleiter- und Leistungselektronik, Magnet- und

Werkstoffkompetenzen sowie automatisierte Montage, Prüfung und Qualitätsabsicherung. Technologieparallele Strategien bieten Chancen, weil Querschnittsprozesse (Gießen, Zerspanen, Umformen, Wärmebehandlung, Fügen, Montage und Prüfung) technologieübergreifend nutzbar sind und Stückkosten senken können. Zugleich steigen Portfolio- und Variantenkomplexität, Entwicklungs-, Industrialisierungs- und Qualifizierungsaufwände sowie Anforderungen an Schnittstellen- und Qualitätsmanagement.

Abgeleitete Handlungsoptionen adressieren kurzfristige Transformationsfähigkeit und langfristige Strukturpolitik. Kurzfristig dominieren schwächenausgleichende und risikodämpfende Maßnahmen: der Ausbau des Depotladens einschließlich Netzanschluss, Lastmanagement und Ladeprozessintegration sowie der Aufbau Lkw-geeigneter Lade-Hubs entlang der Korridore – für Wasserstoffpfade sind dies Tankstellenkorridore und Logistikketten. Ergänzend dazu werden wirtschaftspolitische Hebel zur Beschleunigung von Investitionssicherheit und Skalierung benannt, insbesondere Forschungs- und Investitionsförderung sowie Subventionen und Kredite für Produktionsaufbau und Flottenumstellung. Chancenverstärkend wirken abgesicherte Energiepfade (langfristige Strombezugsmodelle, Wasserstoff-Abnahmeverträge und Skalierungseffekte) sowie die Skalierung der Produktion emissionsfreier Fahrzeuge und Kernkomponenten zur CAPEX-Senkung über Industrialisierung und Lernkurven. Kooperationen als Beschleuniger umfassen Partnerschaften zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, Konsortien zur Standardisierung sowie Wissenstransfer, Qualifizierung und Rekrutierung. Außerdem werden ein Zweitmarkt für gebrauchte emissionsfreie Nutzfahrzeuge sowie servicebasierte Modelle wie prädiktive Wartung und Diagnostik identifiziert.

03

Einführung in die Nutzfahrzeugbranche in Baden-Württemberg

03

Einführung in die Nutzfahrzeugbranche in Baden-Württemberg

In Kapitel 3 wird die Nutzfahrzeugbranche in Baden-Württemberg als Ausgangspunkt der weiteren Analyse der Antriebswende eingeordnet. Im Fokus steht die Frage, über welche wirtschaftliche Bedeutung der Sektor für Beschäftigung, Umsatz und industrielle Wertschöpfung im Land verfügt und weshalb seine Transformation für das Erreichen der Klima- und industriepolitischen Ziele besonders relevant ist. Dazu wird zunächst die makroökonomische Rolle der Branche im Kontext des verarbeitenden Gewerbes beschrieben und die Stellung der Nutzfahrzeugproduzenten sowie ihrer Zulieferer im industriellen Gefüge Baden-Württembergs skizziert. Darauf aufbauend werden Umwelteinflüsse schwerer Nutzfahrzeuge sowie die wichtigsten regulatorischen und technologischen Treiber der Dekarbonisierung herausgearbeitet. In Kapitel 3 wird somit der Hintergrund geschaffen, vor dem die späteren Analysen zu Wertschöpfung, Kompetenzbedarfen und Szenarien der Antriebswende interpretiert werden können.

3.1 Makroökonomische Bedeutung der Nutzfahrzeugbranche in Baden-Württemberg

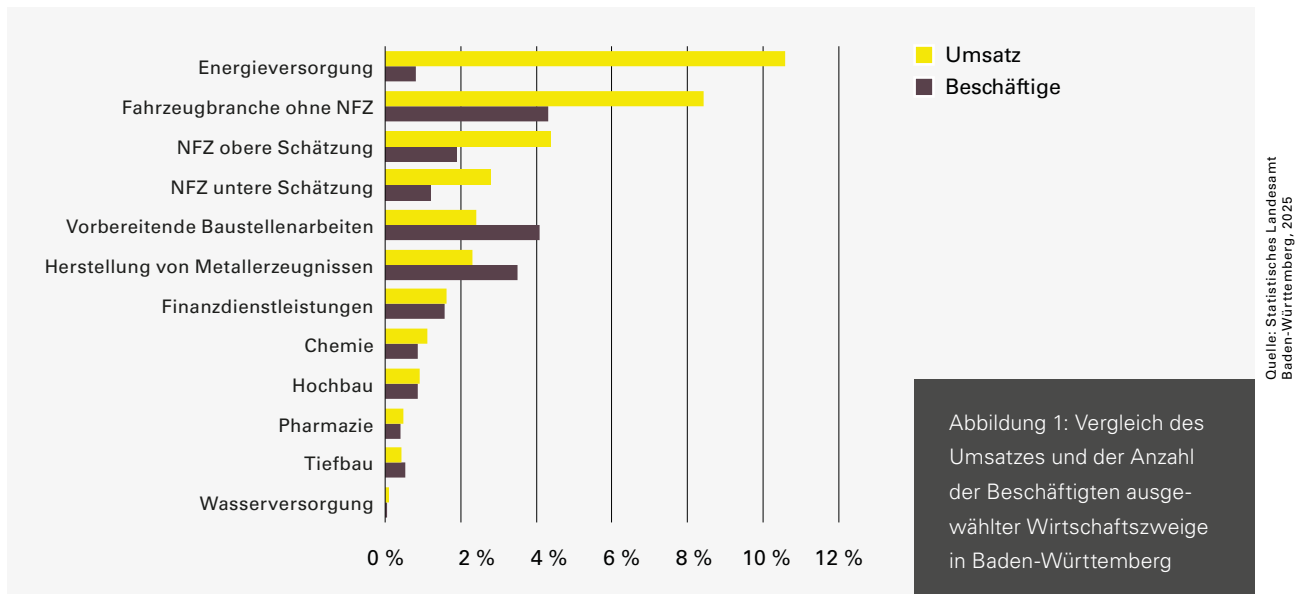
Da die Berechnungen für die Wirtschaftsjahre 2024 und 2025 zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie noch nicht vollständig abgeschlossen waren, werden die Zahlen für 2023 herangezogen. Wo aktuellere Zahlen vorhanden sind, werden diese zusätzlich aufgeführt.

In Baden-Württemberg waren im Jahr 2023 insgesamt 6,42 Millionen Menschen erwerbstätig. Der Umsatz der im Land ansässigen Unternehmen belief sich im selben Jahr auf rund 1.602 Milliarden Euro. Im verarbeitenden Gewerbe sind mit rund 30 Prozent die meisten Personen beschäftigt. Dieser

Bereich erwirtschaftete 37 Prozent des gesamten Umsatzes in Baden-Württemberg. Im Sektor der Batterien und Akkumulatoren sind lediglich etwa 3500 Personen tätig, was einem Anteil von 0,07 Prozent entspricht. Im Bereich der Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren sind 18.000 Personen beschäftigt (0,35 Prozent). Hersteller von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren beschäftigen 193.000 Personen und erreichen damit einen Beschäftigtenanteil von 3,7 Prozent. Im Jahr 2025 betrug die Zahl der Beschäftigten rund 137.000 und ihr Anteil somit 2,1 Prozent. Die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren erzielte einen Umsatz von 192,98 Milliarden Euro und steht damit für zwölf Prozent des Gesamtumsatzes in Baden-Württemberg. Im Jahr 2025 lag der Umsatz in diesem Wirtschaftszweig bei rund 100,21 Milliarden Euro. Unternehmen werden jeweils dem Wirtschaftszweig zugeordnet, der ihr Hauptgeschäft abbildet. Dies erschwert eine klare Abgrenzung der Nutzfahrzeugbranche von der übrigen Fahrzeugindustrie.¹

Die Nutzfahrzeugbranche lässt sich hierarchisch segmentieren. An oberster Stelle stehen die Produzenten der Nutzfahrzeuge (OEM – Original Equipment Manufacturers). Diese werden von Zulieferern versorgt, die Baugruppen, Komponenten und Software liefern. Je nach Position in der Wertschöpfungskette werden diese Zulieferer in sogenannte Tier-Gruppen eingeteilt. Tier-1-Lieferanten versorgen direkt die OEMs. Tier-2-Lieferanten versorgen sowohl OEMs als auch Tier-1-Lieferanten. Der größte in Baden-Württemberg ansässige OEM ist die Daimler Truck AG. Das Unternehmen erzielte im Jahr 2023 einen Konzern-Jahresumsatz von 55,89 Milliarden Euro. Dieser global erzielte Umsatz entspricht 3,5 Prozent des Gesamtumsatzes aller Unternehmen in Baden-Württemberg. Neben Daimler Truck existieren außerdem ein Werk von Iveco

1 | Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2025



in Ulm sowie die Magirus GmbH. Iveco produziert seit 2021 in Ulm FCET und BET; Magirus stellt Sonderfahrzeuge her. Zu den nach Unternehmensumsatz bedeutendsten Zulieferern in der Fahrzeugbranche zählen die Robert Bosch GmbH, die ZF Friedrichshafen AG, die Freudenberg SE, die Mahle GmbH sowie die Mann + Hummel International GmbH & Co. KG. Bei diesen Unternehmen lässt sich jedoch nicht eindeutig abgrenzen, welcher Anteil des Umsatzes und der Beschäftigten der Nutzfahrzeugbranche zuzurechnen ist und welcher Anteil anderen Wirtschaftszweigen. Einige Unternehmen veröffentlichen lediglich Größenordnungen zur Bedeutung der Nutzfahrzeugbranche. So erzielt Bosch laut Angaben der Deutschen Presse-Agentur (dpa) etwa 25 Prozent seines Umsatzes im Bereich der Nutzfahrzeuge.¹ Auch Mahle gibt eine Größenordnung für die Relevanz der Nutzfahrzeugbranche an: Dort sind ihr 16 bis 17 Prozent des Umsatzes zuzuordnen.² Bei ZF macht die Branche laut eigenem Jahresabschlussbericht 19 Prozent des Unternehmens aus.³

Aus diesen Werten wird ein Korridor für die Relevanz der Nutzfahrzeugbranche für die Zulieferer abgeleitet. Wird dieser Korridor von 16 bis 21 Prozent Nutzfahrzeuganteil in der Fahrzeugbranche auf die Wirtschaftszweige Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, Sonstiger Fahrzeugbau

und Handel mit Kraftfahrzeugen: Instandhaltung und Reparatur angewandt, lässt sich ermitteln, dass etwa 1,2 bis 1,9 Prozent der Beschäftigten in Baden-Württemberg in der Nutzfahrzeugbranche tätig sind und diese etwa 2,8 bis 4,4 Prozent des Gesamtumsatzes erzielt. Der Vergleich der Nutzfahrzeug (NFZ)-Branche mit anderen Wirtschaftszweigen ist in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1 verdeutlicht, dass die Nutzfahrzeugbranche für das Land Baden-Württemberg von erheblicher Bedeutung ist. Ihr Umsatz liegt dieser Berechnung zufolge über demjenigen der Chemie- und Pharmaindustrie. Die untere Umsatzschätzung befindet sich etwa auf dem Niveau der vorbereitenden Baustellenarbeiten. Auffällig ist zudem, dass das Verhältnis von Umsatz zu Beschäftigtenzahl in der Nutzfahrzeugbranche besonders ausgeprägt ist. Deutlich höhere Werte werden nur im Sektor der Energieversorgung erreicht. Alle anderen aufgeführten Branchen benötigen zur Erzielung vergleichbarer Umsätze im Verhältnis mehr Mitarbeitende.

1 | Sven Prawitz, 16. September 2024

2 | Götz Fuchslocher, 15. Juni 2018

3 | ZF Friedrichshafen AG 2024, S. 2

3.2 Analyse des Umwelteinflusses schwerer Nutzfahrzeuge

Die Treibhausgasemissionen der EU entstehen zu mehr als 6,9 Prozent durch schwere Nutzfahrzeuge. Obwohl diese lediglich 2,4 Prozent der Fahrzeugflotte ausmachen, verursachen sie 27,5 Prozent der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor.^{1,2} Über den Verkehrsbereich hinaus entstehen Emissionen für Nutzfahrzeuge auch im Produktionssektor für die Fahrzeug- und Komponentenfertigung sowie im Energiesektor für die Erzeugung von Strom und chemischen Kraftstoffen. Daher entstehen Emissionen also nicht nur im Fahrzeugbetrieb, sondern auch bei der Produktion der Fahrzeuge und ihrer Komponenten sowie bei der Bereitstellung des Energieträgers. Im Jahr 2021 betragen die Lebenszyklusemissionen eines dieselbetriebenen Lkw mehr als 1.200 g CO₂e/km. Ein batterieelektrisch betriebener Lkw emittierte mit dem Strommix des Jahres 2021 hingegen nur etwa 470 g CO₂e/km. Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge verursachen in ihrem Lebenszyklus etwa 1.100 g CO₂e/km, wenn sie mit sogenanntem grauem Wasserstoff betankt werden, und 175 (g CO₂e/km bei einer Betankung mit grünem Wasserstoff. Die Lebenszyklusemissionen der alternativen Antriebstechnologien entstehen insbesondere bei der Stromproduktion. Wird die hierfür eingesetzte Energie beziehungsweise der produzierte Wasserstoff aus nachhaltigen Quellen bezogen, verringern sich die Lebenszyklusemissionen deutlich. Darin liegt ein wesentliches Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Der auf die Produktion bezogene Umwelteinfluss eines BET wird erheblich von der Batterieproduktion geprägt, die 2021 rund 76 g CO₂e/km verursachte. Im Jahr 2030 wird sich dieser Wert allerdings weiter reduzieren, wenn auch in der Produktion grüne Energie zum Einsatz kommt.³

3.3 Identifikation übergeordneter Treiber der Antriebswende

Das übergeordnete Ziel der Europäischen Union ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen. Da die EU weder die Emissionen noch den Fahrzeugbestand bestimmen kann, reguliert sie alle Teilnehmer des Nutzfahrzeugmarktes und sorgt auf diese Weise dafür, dass die gesamte Nutzfahrzeugbranche kontinuierlich nachhaltiger wird. Die Akteure, die die EU dazu

verpflichtet, an der Emissionsreduktion mitzuwirken, sind die OEMs, die Energielieferanten und die Mitgliedstaaten.

Die Rolle der OEMs

Die EU verpflichtet die OEMs, Flottengrenzwerte für ihre Neuzulassungen einzuhalten. Referenzjahr ist 2019. Alle Reduktionen werden auf Basis der damaligen Flottenemissionen aller Hersteller berechnet. Bis 2025 sollen die Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von mehr als 16 Tonnen um 15 Prozent sinken. Bis 2030 ist eine Reduktion um 45 Prozent vorgeschrieben, bis 2035 um 65 und bis 2040 um 90 Prozent gegenüber den Flottengrenzwerten von 2019. Die Emissionen eines schweren Nutzfahrzeugs werden für den Betrieb in g CO₂/t km verglichen, so dass sowohl die zurückgelegte Strecke als auch die transportierte Masse berücksichtigt werden. Diese Vorgaben sind in der Verordnung (EU) 2024/1610 festgelegt.⁴ Werden die Vorgaben nicht erreicht, folgt eine einmalige Strafzahlung durch den Fahrzeughersteller. Die Strafzahlung wird von 2025 bis 2029 mit 4.250 €/g CO₂ t km und ab 2030 mit 6.800 €/g CO₂ t km beziffert.

Verfehlt beispielsweise Daimler Truck im Jahr 2025 die Zielvorgabe um ein Prozent, ergibt sich eine Strafzahlung von rund 140 Millionen Euro – was etwa vier Prozent des Gewinns von Daimler vor Zinsen und Steuern entspricht. Im Jahr 2030 würde dieselbe prozentuale Zielverfehlung eine Strafzahlung von 224 Millionen Euro nach sich ziehen. Über die Einhaltung der Flottengrenzwerte für die Jahre 2024 und 2025 wurde zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Studie noch nicht berichtet. Aus den Strafzahlungen ergibt sich ein deutlicher wirtschaftlicher Anreiz, emissionsarme Fahrzeuge zu verkaufen. Die OEMs müssen dabei abwägen, in welchem Umfang sie die Fahrzeugpreise senken, um die notwendigen Zulassungszahlen zu erreichen. Innerhalb einer Reduktionsperiode (2025 bis 2029, 2030 bis 2034, 2035 bis 2039 und ab 2040) wird eine lineare Kurve angesetzt, um Gutschriften zu berechnen.⁵ Unterbietet ein OEM die Reduktionsvorgabe dieser Kurve, wird dies als Gutschrift festgehalten und ist innerhalb einer Reduktionsperiode anrechenbar. Strafen müssen jährlich bezahlt werden. Gutschriften müssen innerhalb einer

1 | European Commission 2024, S. 155

2 | Iacea 2025, S. 7–10

3 | Adrian O'Connell, Nikita Pavlenko, Georg Bieker, Stephanie Searle 2023

4 | Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, S. 12

5 | Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, S. 6

Reduktionsperiode angerechnet werden und verfallen beim Übergang in die nächste.

Für das Inverkehrbringen eines BET oder FCET wird ein weiterer Anreiz geschaffen. Zum einen reduzieren diese Fahrzeuge die Flottenemissionen, da sie kein CO₂ emittieren. Zum anderen trägt ihre Zulassung zur Bildung eines weiteren Reduktionsfaktors bei, der die Vorgabe der Flottengrenzwerte um bis zu drei Prozent senken kann. Durch die Dynamik aus Flottengrenzwerten, Gutschriften und Strafzahlungen können hohe Preisschwankungen entstehen. Vor allem zum Ende einer Reduktionsperiode könnten Hersteller mit bereits erreichten Flottengrenzwerten sowie Hersteller, die diese Ziele noch erreichen müssen, miteinander in einen Preiskampf geraten. Abbildung 2 zeigt die Ziele für die Flottenemissionen und eine mögliche Trajektorie für ihre Erreichung.

In Abbildung 2 sind die Emissionsvorgaben für Daimler Truck und Iveco Magirus verdeutlicht. Die Obergrenzen der Flottenemissionen sind jahresweise bis 2040 aufgeführt und als Balken dargestellt. Darüber hinaus ist auch die Kurve aufgeführt, die als Bemessungsgrundlage für die Gutschriften gilt. Liegt der Flottenemissionswert eines Jahres über dem durch einen Balken gekennzeichneten Wert, wird eine Strafe fällig. Liegt

der Wert unterhalb der Kurve, entsteht eine anrechenbare Gutschrift.

Die Rolle der Energie- und Kraftstofflieferanten

Neben neu zugelassenen Nutzfahrzeugen hat auch der eingesetzte Energieträger (Diesel, Strom, Wasserstoff) Einfluss auf die Emissionen und ist daher Gegenstand der EU-Regulierung. Die EU hat hierzu die Richtlinie 2023/2413 veröffentlicht, die häufig als RED III (Renewable Energy Directive III) bezeichnet wird.¹ Darin ist festgelegt, dass der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor im Jahr 2030 zu 29 Prozent aus erneuerbaren Energien stammen muss. Zentrales Instrument zur Regulierung ist das Emissionshandelssystem EU-ETS2 (Emission Trade System). Unternehmen, die Energieträger in Verkehr bringen, sind verpflichtet, für die verursachten CO₂-Emissionen aufzukommen. Für jedes Kilogramm CO₂ muss ein Zertifikat erworben werden. Im Unterschied zum aktuell geltenden EU-ETS werden keine kostenlosen Zertifikate mehr zugeteilt. Dadurch werden emissionsärmere Energieträger im Vergleich günstiger und emissionsintensivere Energieträger teurer. Alternativ gelten die Ziele der Richtlinie 2023/2413 auch dann als erfüllt, wenn im gesamten Verkehrssektor eine Reduktion der Treibhausgasintensität um 14,5 Prozent

1 | Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, L-2985 Luxemburg

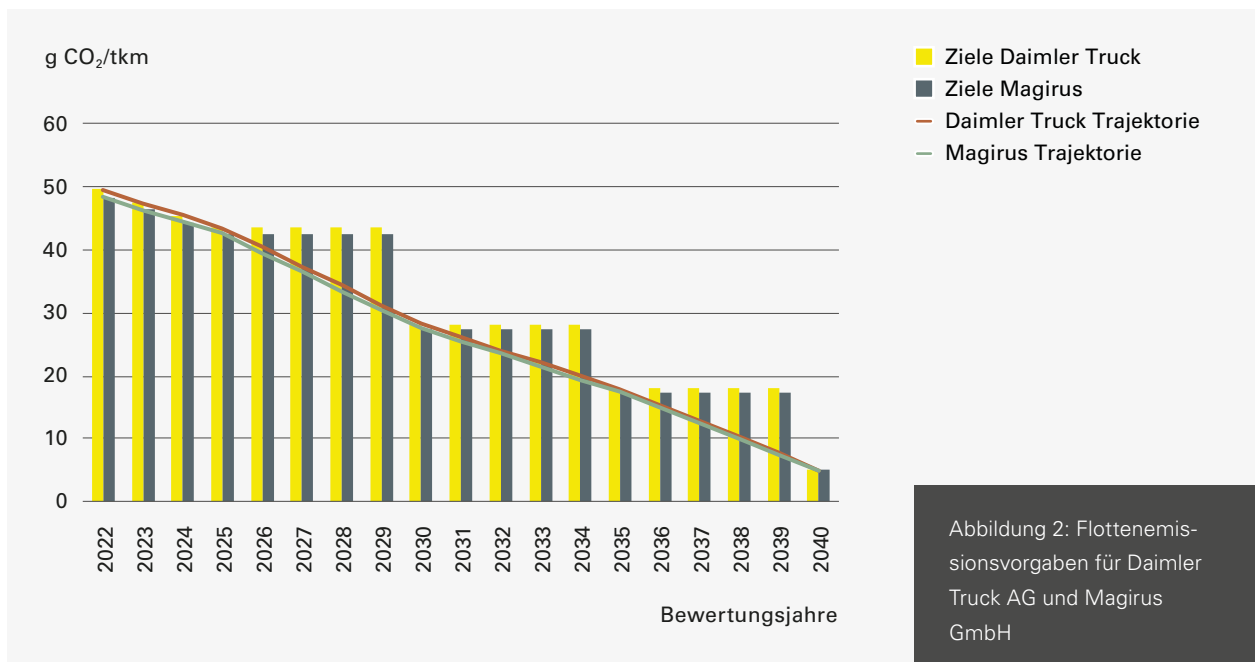


Abbildung 2: Flottenemissionsvorgaben für Daimler Truck AG und Magirus GmbH

Quelle: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union Durchführungsbekanntmachung 2025/1786 und 2025/792

erreicht wird. Die Treibhausgasintensität wird in g CO₂ e/MJ ermittelt. Es stehen also zwei Pfade zur Realisierung der Emissionsreduktion offen: Es kann entweder der Anteil erneuerbarer Energie erhöht oder es können die Emissionen reduziert werden. Außerdem verpflichtet die EU ihre Mitgliedstaaten dazu, für das Erreichen der Emissionsziele zu sorgen.¹

Die Rolle der EU-Mitgliedstaaten

Die EU reguliert sowohl die OEMs als auch die Kraftstofflieferanten. Damit schwere Lkw betrieben werden können, ist zudem eine geeignete Infrastruktur erforderlich, deren Ausbau durch die Mitgliedstaaten sicherzustellen ist. Rechtsgrundlage hierfür ist die Verordnung (EU) 2023/1804, die häufig als AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) bezeichnet wird. Zentrale Ziele dieser Verordnung sind der schrittweise Ausbau der Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge sowie der Aufbau einer Wasserstofftankstellen-Infrastruktur. Die Ausbauziele sind jeweils für das Ende der Jahre 2025, 2027 und 2030 definiert. Bis 2025 müssen 15 Prozent des TEN-V-Straßennetzes mit entsprechender Infrastruktur erschlossen sein, bis 2027 sind 50 Prozent zu erreichen, bis 2030 eine vollständige Abdeckung mit einem maximalen Abstand von 60 Kilometern. Die standortgebundene Ladeleistung steigt dabei von 1400 auf 3600 Kilowatt. Die minimale Ladeleistung je Ladepunkt bleibt bis 2030 bei 350 Kilowatt bestehen. Die Anzahl der 350-Kilowatt-Ladepunkte erhöht sich jedoch erst im Jahr 2030 von einer auf zwei Ladesäulen pro Standort.

Der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur liegt ebenfalls in der Verantwortung der Mitgliedstaaten. Die EU definiert dazu ein Ziel für das Jahr 2030: Entlang des TEN-V-Straßennetzes müssen Wasserstofftankstellen mit einem maximalen Abstand von 200 Kilometern errichtet werden. Jede Tankstelle muss eine Kapazität von mindestens einer Tonne pro Tag aufweisen, und wenigstens eine Zapfsäule je Standort muss einen Mindestdruck von 700 bar bereitstellen können. Darüber hinaus können die Mitgliedstaaten eigene nationale Regelungen erlassen, etwa zur Ausgestaltung von Mauttarifen. In Deutschland sind emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge beispielsweise bis 30. Juni 2031 von der Lkw-Maut befreit.²

Transformationsdruck durch mehrfache Regulierung

- Flottengrenzwerte für OEMs: –45 % bis 2030, –65 % bis 2035. Strafzahlungen von 4.250–6.800 € pro g CO₂/t km Verfehlung
- AFIR-Infrastrukturziele: Vollständige Ladeinfrastruktur-Abdeckung des TEN-T-Netzes bis 2030 (max. 60 km Abstand). H₂-Tankstellen alle 200 km
- Mautbefreiung für emissionsfreie Lkw bis 30.06.2031

¹ | Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, L-2985 Luxemburg, S. 51

² | Bundesministerium für Verkehr 2025

04

Technologien der Antriebswende

04

Technologien der Antriebswende

In diesem Kapitel werden die Technologien der Antriebswende systematisch untersucht, um zwei Leitfragen zu beantworten: Welche klimafreundlichen Antriebstechnologien sind für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen tatsächlich relevant, und wie können realistische Hochlaufszenerarien für Europa bis zum Jahr 2035 beschrieben werden? Methodisch wird in dem Kapitel eine Bottom-up-Technologie-Evaluation mit einer Top-down-Szenario-Analyse kombiniert. Die Bottom-up-Perspektive adressiert den heutigen Stand der verfügbaren Technologien (batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge, wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren sowie Plug-in-Hybrid- und Range-Extender-Konzepte) und bewertet deren jeweilige Eignung für unterschiedliche Anwendungen. Darauf basierend werden in der Top-down-Analyse Marktszenarien für Europa bis 2035 abgeleitet, in denen sich verschiedene technologiepolitische Ausrichtungen wie eine Dominanz batterieelektrischer Antriebe, Technologieoffenheit oder ein starker Fokus auf Wasserstoff widerspiegeln. Aus diesen Szenarien werden mögliche Hochlaufkurven alternativer Antriebstechnologien auf Basis bestehender Marktstudien und politischer Rahmenbedingungen abgeleitet.

4.1 Bottom-up-Technologie-Evaluation

Kapitel 4.1 ist auf die Bottom-up-Technologie-Evaluation fokussiert und adressiert damit die Frage „Wo stehen wir heute?“ Eine Einführung in die alternativen Antriebskonzepte und die jeweils erforderliche Infrastruktur sind im Anhang in Kapitel 9.1 aufgeführt. Ausgewählte Anwendungsszenarien für diese Fahrzeuge für den schweren Straßengüterverkehr werden in Kapitel 4.1.1 konkretisiert. Anschließend werden die Kriterien zur Bewertung der Relevanz der Antriebstechnologien definiert, beispielsweise Technologie- und Marktreife, Beitrag zur Dekarbonisierung, Kompatibilität mit der Energie- und Lade- beziehungsweise Betankungsinfrastruktur sowie die Gesamtkosten des Betriebs. Diese Kriterien werden in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall priorisiert und in einer systematischen Bewertung der alternativen Antriebs-

technologien zusammengeführt. Auf dieser Grundlage wird insbesondere die eingeschränkte Eignung von PHET- (Plug-in Hybrid-Electric Truck) und REET-Konzepten (Range-Extender Electric Truck) für den Langstrecken-Schwerlastverkehr herausgearbeitet, so dass sich ein fokussierter Technologierahmen für die nachfolgenden Szenario-Analysen ergibt.

4.1.1 Definition von Betriebsszenarien

Die Lkw der Klasse N3 umfasst ein breites Feld individueller Fahrzeuge und Anwendungen. Beginnend ab einer zulässigen Gesamtmasse von zwölf Tonnen umfasst sie Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von bis zu 40 Tonnen. Bei einem derart großen Rahmen ist es sinnvoll, diese Fahrzeuge zu untergliedern. Dafür gibt es diverse Ansätze, beispielsweise nach Aufbau und Einsatzzweck. Um die Vorzüge und Nachteile der Antriebskonzepte anschließend mit Blick auf die Entwicklung ihrer Marktanteile zu betrachten, werden die Fahrzeuge nach ihrem Einsatz im Betrieb unterteilt. Dazu werden drei Anwendungskategorien definiert: Verteilerverkehr, Linienverkehr und Fernverkehr. Die Anwendungen unterscheiden sich maßgeblich durch die Laufleistung der Fahrzeuge, ihrer zulässig Gesamtmasse sowie die damit verbundenen Betriebsprofile. Für die Analyse werden die Kategorien folgendermaßen definiert.

Verteilerverkehr: Fahrzeuge im Verteilerverkehr absolvieren typischerweise 300 bis 500 Kilometer pro Tag. Dabei handelt es sich überwiegend um zwei- oder dreiachsige Solofahrzeuge ohne Trailer mit einer zulässigen Gesamtmasse von 12 bis 20 Tonnen. Sie kommen überwiegend innerstädtisch und regional mit häufigen Stopps zum Einsatz. Die Fahrzeuge werden nachts am Depot abgestellt.

Linienverkehr: Im Linienverkehr liegen die täglichen Fahrstrecken meist bei 400 bis 600 Kilometern. Eingesetzt werden häufig zwei- oder dreiachsige Fahrzeugzüge mit Trailer und einer zulässigen Gesamtmasse von 20 bis 35 Tonnen. Die Fahr-

profile sind durch wiederkehrende Relationen zwischen definierten Standorten geprägt; ein Großteil der Strecke entfällt auf Landstraßen und Autobahnen. Die Standzeiten sind gering und vor allem auf Be- und Entladevorgänge am Depot beziehungsweise an Umschlagpunkten konzentriert.

Fernverkehr: Im Fernverkehr werden typischerweise 600 bis 800 Kilometer pro Tag zurückgelegt. Dominant sind Sattelzugmaschinen mit Trailer bis zu einer zulässigen Gesamtmasse von rund 40 Tonnen. Der Betrieb erfolgt vorwiegend überregional beziehungsweise grenzüberschreitend sowie im Charterverkehr. Nachts werden die Fahrzeuge häufig außerhalb von Depots abgestellt, zum Beispiel auf Rastanlagen oder in Gewerbegebieten.

Die Eigenschaften der Laufleistung und der Masse wirken sich maßgeblich auf den Energiebedarf der Fahrzeuge aus. Der Betriebsmodus und der Aufenthaltsort haben einen erheblichen Einfluss auf die Möglichkeiten zur Gestaltung der Betriebsstrategie. So können Verteilerfahrzeuge anstatt zu tanken als BET nachts im Depot geladen werden, um einen unterbrechungsfreien Betrieb zu ermöglichen. Fernverkehrsfahrzeuge hingegen bräuchten aufgrund des Energiebedarfs entweder zu jeder Ruhepause des Fahrers eine Zwischenladung der Batterie oder eine andere Form der Batteriespeicherung. In Abbildung 56 im Anhang werden die Annahmen hinsichtlich der Fahrzeugkategorien zusammengefasst.

4.1.2 Evaluation der zukünftigen Relevanz von Antriebstechnologien

Um die aufgeführten Technologien der Antriebswende in Bezug auf ihre Eignung für den Einsatz in den definierten Betrachtungsszenarien bewerten zu können, werden im Folgenden dedizierte Bewertungskriterien aufgestellt. Die zu betrachtenden Kriterien werden dabei in ökologische, ökonomische und nutzungsbezogene Kriterien unterteilt.

Senkung der CO₂-Emissionen gegenüber konventionellen Antriebstechnologien

Als erstes Bewertungskriterium wird die Senkung der CO₂-Emissionen und somit der Beitrag zur Reduktion der Klimaerwärmung herangezogen. Als Basis dient der CO₂-Ausstoß eines durchschnittlichen konventionellen Fahrzeugs. Da die Antriebsstränge bei gleicher Zuladung und Betriebsprofil miteinander verglichen werden, wird auf ihre quantitative Definition verzichtet. Basierend auf dem Betriebsprofil der An-

triebsstränge wird die prozentuale Senkung der Emissionen relativ zum konventionellen Dieselantriebsstrang bestimmt.

Vorhandene Infrastruktur

Zur Bewertung der Nutzbarkeit der Antriebstechnologien im täglichen Gebrauch wird als zweites Bewertungskriterium die bereits vorhandene Infrastruktur herangezogen. Dieser Faktor erlaubt zusätzlich Rückschlüsse auf die Wirtschaftlichkeit der Technologie aufgrund eventuell notwendiger Zusatzstrecken für das Laden beziehungsweise Tanken. Darüber hinaus werden auch Aspekte wie die Lade- und Tankdauer sowie potenzielle Wartezeiten an den Zapfsäulen berücksichtigt. Dieser Faktor ist also entsprechend eng mit der Reichweite je Ladung beziehungsweise Betankungsvorgang verknüpft.

Technischer Reifegrad von System und Komponenten

Das dritte Bewertungskriterium ist der technische Reifegrad von System und Antriebskomponenten. Hierfür werden das „Technology Readiness Level“ (TRL) sowie das „Manufacturing Readiness Level“ (MRL) herangezogen. TRL beschreibt die technische Reife eines Produkts, während MRL für die Möglichkeit steht, es in Serie zu produzieren. Die Faktoren ermöglichen einen Rückschluss auf das Potenzial der schnellen Umsetzung einer Serienproduktion sowie der Verringerung der Produkt- und der Produktionskosten.

Total Cost of Ownership (TCO) – Gesamtlebenszykluskosten

Zur ökonomischen Bewertung der Antriebstechnologien wird die Betrachtung der Gesamtlebenszykluskosten (TCO) herangezogen. Dieser Wert ergibt sich aus der Summe aller während der Lebensphase des Fahrzeugs entstehenden Kosten – beispielsweise Investitionen, Wartung, Reparatur und Kraftstoff- oder Versicherungsaufwendungen. Eine besondere Rolle spielen dabei sowohl der Kauf- und Wiederverkaufspreis als auch die Kraftstoffkosten und der Verbrauch, die mit der Betriebsdauer allesamt erheblich skalieren.

Reichweite je Ladung/Betankung

Als letztes Bewertungskriterium wird die Reichweite der Fahrzeuge zwischen zwei Betankungs- oder Ladevorgängen herangezogen. Dieser Wert stellt einen ökonomischen Faktor dar, weil mit jedem Lade- beziehungsweise Betankungsvorgang Standzeiten und somit Kosten verbunden sind. Hinzu kommt

die nicht quantifizierbare Unsicherheit über die sichere Abwicklung des Lade- oder Tankvorgangs.

Da die alternativen Antriebsstränge im Folgenden mit dem konventionellen Dieselmotor verglichen werden, wird auch dieser mit Blick auf die gewählten Kategorien eingeordnet.

Der **konventionelle Verbrennerantriebsstrang (ICET)** kann durch die Steigerung der Effizienz des Antriebs in Relation zum heutigen Verbrenner in seinen Emissionen reduziert werden. Mit zirka 14.000 Straßentankstellen besteht ein feingranulares, flächendeckendes Versorgungsnetz.¹ Fahrzeuge mit diesem Antriebsstrang werden in großen Stückzahlen in Serie produziert. Dementsprechend sind die Neupreise von Zugmaschinen mit einer zulässigen Gesamtmasse von 40 Tonnen relativ gering und liegen zwischen 100.000 und 150.000 Euro. Die Kraftstoffkosten werden durch die Kraftstoffsteuer beaufschlagt. Außerdem fällt eine Maut an. Je nach Tankgröße des Fahrzeugs reicht eine Tankfüllung für eine Strecke zwischen 1000 und 3000 Kilometern.

Der **batterieelektrische Antriebsstrang (BET)** emittiert lokal kein CO₂. Global ist seine Emission jedoch stark vom Strommix abhängig. Das Netzwerk der Ladepunkte wächst europaweit stark, jedoch sind explizit Lkw-geeignete Ladepunkte notwendig, die bisher nur in geringerer Anzahl existieren. Die ersten kleineren BET-Serien sind in Europa angelaufen, eine Skalierung ist demnach möglich. Die Fahrzeuge besitzen aufgrund der aktuell hohen Batteriepreise einen zirka zwei- bis zweieinhalbmal höheren Neupreis als konventionelle Lkw, jedoch ist der elektrische Strom vor allem im Fall einer eigenen Photovoltaikanlage günstig. Schnellladevorgänge sind teurer als langsamere. Eine Batterieladung reicht ungefähr für 250 bis 500 Kilometer.² Mit einer Batteriekapazität von 600 Kilowattstunden ist eine theoretische Reichweite von rund 600 Kilometern möglich. Im realen Betriebsfenster einer Batterieladung von 20 bis 80 Prozent bleiben nutzbare 360 Kilowattstunden – also rund 360 Kilometer.

Der **brennstoffzellenelektrische Antriebsstrang (FCET)** emittiert, wie der BET, lokal keinerlei CO₂. Jedoch ist auch hier die globale Emission von der Wasserstoffquelle sowie ge-

gebenenfalls dem Strommix abhängig. Das Wasserstofftankstellennetz für 350 bar in Deutschland umfasst derzeit rund 45 Standorte und bleibt damit eingeschränkt ausgebaut.³ Jedoch ist infolge der AFIR-Verordnung der Europäischen Union bis zum Jahr 2035 ein Hochlauf zu erwarten. Die Fahrzeuge wurden bisher in äußerst geringen Stückzahlen im Manufakturmaßstab produziert, sodass Potenziale zur Kostenreduktion vor allem in den Komponenten der Brennstoffzelle und dem Tanksystem zu erwarten sind. Wegen der hohen Komponentenkosten für Brennstoffzelle und Tanksystem sowie der relativ teuren Batterie liegen Neufahrzeuge heute beim vier- bis fünffachen Preis eines konventionellen Lkw. Trotz der hohen Kosten und der bisher geringen Stückzahl produzierter Fahrzeuge setzten diverse OEM auf diese Technologie. Eine Tankfüllung reicht aktuell für rund 450 Kilometer bei 350 bar, für etwa 800 Kilometer bei 700 bar und für bis zu 1050 Kilometer im Falle von Flüssigwasserstoff.⁴

Der **wasserstoffverbrennende Antriebsstrang (H2-ICET)** ist ähnlich zum FCET zu bewerten. Auch hier ist die globale CO₂-Emission von der Wasserstoffgewinnung abhängig, jedoch erzeugt die Verbrennung im Motor Stickoxide und Geräuschemissionen. Die Fahrzeuge können auf dieselbe Wasserstoffinfrastruktur zugreifen und stellen in Relation sogar geringere Anforderungen an die Reinheit des Wasserstoffs. MAN bringt derzeit die erste kleine Serie von H2-ICET auf die Straße. Vor allem durch die hohe Ähnlichkeit des Antriebsstrangs mit ICET und gasverbrennenden Lkw-Motoren sind bereits heute die Neupreise dieser Fahrzeuge vergleichbar mit denen von BET. Durch die Nutzung der Verbrennertechnologie ist ein Teil des Einsparungspotenzials jedoch bereits aufgehoben. Wie bei FCET reicht eine Tankfüllung für 500 bis 1000 Kilometer.

Der **Hybrid- oder Range-Extender-Antriebsstrang (PHET/REET)** ist vergleichbar mit dem ICET. Er stößt lokal CO₂ aus, sofern der Verbrenner eingesetzt wird. Die Emissionen des geladenen Stroms sind von der Erzeugung abhängig. Zum Betrieb greift er auf die Lade- sowie auf die Diesel-Tankstelleninfrastruktur zu, was ihn unabhängiger macht, als ein BET es ist. Das Fahrzeug wird vor allem theoretisch diskutiert, da es zwar die Vorteile des BET mit denen des ICET vereint, jedoch auch deren Kosten. Das führt in der Praxis häufig zur

1 | ADAC 2021

2 | Bayerlein et al. 2025

3 | H2 MOBILITY 2025

4 | Bayerlein et al. 2025

Entscheidung für eine der beiden Technologien. Der Neupreis ist daher aktuell nicht verlässlich zu beziffern, dürfte jedoch beim Eineinhalbfachen bis hin zum Doppelten von ICET liegen. Die Reichweite wäre elektrisch diejenige eines kleinen BET, im Verbrennermodus hingegen diejenige eines ICET. Zwei Überlegungen machen diesen Antriebsstrang unterdessen interessant: Die Erhöhung der Reichweite eines BET sowie die Steigerung der Effizienz eines ICET. In beiden Fällen liegen die Gesamtkosten des Antriebsstrangs jedoch zu hoch. Da die Technologie bis dato durch keinen OEM für die Serienproduktion angekündigt wurde, wird sie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

4.2 Top-down-Szenario-Analyse

Im Rahmen dieser Studie werden Szenarien entwickelt und bewertet, die sich vor allem hinsichtlich der Förderlandschaft und der Kosten für die Technologien voneinander unterscheiden. Die Analyse ermöglicht ein differenziertes Bild des zukünftigen Technologiemicxes und eine Bewertung der Relevanz verschiedener Antriebskonzepte entlang unterschiedlicher Förder- und Entwicklungspfade. Die Szenarien werden in einem Gesamtbetriebskostenmodell abgebildet. In diesem Kapitel werden nach den drei Szenarien der Aufbau des Modells sowie die allgemeinen und szenariospezifischen Annahmen beschrieben. Anschließend wird das Modell ausgewertet und es werden die Effekte der Szenario-Variationen und der verschiedenen Anwendungsfälle untersucht. Darauf basierend werden Prognosen für den Hochlauf der Technologien in den jeweiligen Szenarien abgeleitet und diskutiert. Außerdem wird eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen, um den Einfluss einzelner Komponenten und Annahmen auf die Gesamtbetriebskosten zu quantifizieren und zu identifizieren, welche davon die wichtigsten Einflussfaktoren sind.

4.2.1 Szenarien für den Hochlauf alternativer Antriebstechnologien

Es werden drei Szenarien erstellt, anhand derer unterschiedliche Pfade für den Antriebswechsel betrachtet werden. Dabei wird zwischen „Business as usual“, Batterie-Fokus und Wasserstoff-Fokus unterschieden. Im Folgenden werden die Szenarien und die ihnen zugrundeliegenden Annahmen erklärt.

„Business as usual“

Das Szenario „Business as usual“ wird durch das Fortsetzen der bisherigen politischen Rahmenbedingungen und Anreize definiert. Diese Annahme beschreibt, dass keine Vorgabe zur technischen Umsetzung für die Erreichung der Ziele zur Emissionsreduktion gemacht wird. Das Szenario wird durch eine moderate Reduktion der Kaufpreise von ZET und eine moderate Reduktion der Wasserstoffpreise modelliert.

Batterie-Fokus

Das Szenario „Batterie-Fokus“ wird durch eine gezielte Förderung der batterieelektrisch angetriebenen Lkw beschrieben. In dieser Hypothese wird eine schnelle Reduktion der Anschaffungskosten für BET modelliert. Außerdem wird eine Reduktion der Strompreise angenommen. Die übrigen Aspekte der Modellierung bleiben wie in den anderen Szenarien bestehen.

Wasserstoff-Fokus

Das Szenario „Wasserstoff-Fokus“ wird durch eine gezielte Förderung der wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeuge (FCET & H2-ICET) beschrieben. Außerdem wird in dieser Annahme davon ausgegangen, dass die Wasserstoffpreise stärker sinken als in den anderen Szenarien. Diese Reduktion könnte durch eine Förderung oder eine schnellere Marktentwicklung zustande kommen. Der FCET und der H2-ICET werden in diesem Szenario durch eine zusätzliche Kaufprämie gefördert.

4.2.2 Entwicklung des Gesamtbetriebskostenmodells

Im nächsten Schritt werden die beschriebenen Szenarien in modellierbare Parameter überführt. Dazu werden für jede Technologie szenariospezifische Entwicklungen der Anschaffungskosten (CAPEX) sowie der Energiepreise und weiterer Betriebskostenkomponenten (OPEX) definiert und im TCO-Modell abgebildet. Niedrigere TCO erhöhen die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit und damit die Marktdurchsetzungschancen. Die Bewertung der TCO (Gesamtbetriebskosten, „Total Cost of Ownership“) ist von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig. Im Rahmen dieser Studie werden dazu die CAPEX (Investitionskosten, „Capital Expenditures“) und die

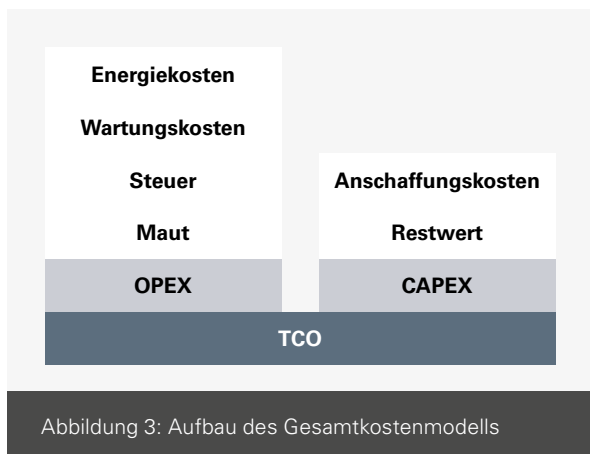


Abbildung 3: Aufbau des Gesamtkostenmodells

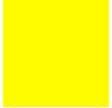
OPEX (Betriebskosten, „Operational Expenditures“) für die vier als relevant identifizierten Technologien (ICET, BET, FCET, H2-ICET) modelliert. Der Aufbau des Gesamtbetriebskostenmodells ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die OPEX setzen sich aus den vier Komponenten Energiekosten, Wartungskosten, Steuer und Maut zusammen. Die Fahrerkosten wurden nicht berücksichtigt, da diese für alle verglichenen Technologien als identisch angenommen werden. Eine pauschale Einbeziehung der Versicherungskosten würde die Aussagekraft der Analyse reduzieren, da sie auf vereinfachenden Annahmen beruhen müsste, die den beobachteten Streubereich in der Praxis nicht adäquat abbilden. Dennoch ist festzuhalten, dass die Versicherungskosten in der Realität einen Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten haben können. Die Energiekosten setzen sich aus den Kraftstoffpreisen und den Verbräuchen zusammen. Der ICET verbraucht Diesel und AdBlue, der FCET und der H2-ICET verbrauchen ausschließlich Wasserstoff. Ein Depotladen wird hier nicht berücksichtigt. Der BET verbraucht Strom. Der benötigte Strom kann entweder aus öffentlichen Ladesäulen bezogen werden oder aus dem eigenen Depot. Die Ladeleistung ist ebenfalls entscheidend für den Preis, der pro kWh gezahlt werden muss. Wasserstoff kann im Gegensatz dazu nur an Tankstellen bezogen werden. Aktuell wird Wasserstoff in der Regel bei 350 bar vertrieben. Perspektivisch wird er auch bei 700 bar und in flüssiger Form angeboten. Die Kosten dafür sind allerdings höher als für 350-bar-Wasserstoff, da zusätzliche Prozessschritte notwendig sind. Da der Prozess des Ladens und Tankens im Rahmen dieser TCO nicht analysiert wird, werden 700-bar-Wasserstoff und Flüssigwasserstoff in der TCO-Analyse nicht betrachtet. Diese Technologien können sich nur durch erhöhte Reichweite gegenüber dem 350-bar-Wasserstoff

durchsetzen. Ein weiterer Kostenpunkt ist die Maut, die Betreiber von Nutzfahrzeugen pro gefahrenem Kilometer an den Staat zahlen müssen. Die Maut ist abhängig von der Größe des Fahrzeugs. ZET (englisch: Zero Emission Trucks) sind in Deutschland bis 2031 vollständig von der Maut befreit.¹ Der letzte Faktor, der im Rahmen der OPEX berücksichtigt wird, ist die Steuer. Die Steuer wird ebenfalls abhängig von der Größe sowie der Emissionsklasse des Fahrzeugs erhoben, ist aber mit weniger als 0,01 €/km ein geringer Einfluss.

Die CAPEX ergeben sich aus der Differenz zwischen den Anschaffungskosten und dem Restwert eines Fahrzeugs. Die Anschaffungskosten sind für jede Technologie individuell und ändern sich bis 2035. FCET und BET werden durch steigende Stückzahlen und Technologiesprünge günstiger. Der Diesel wird teurer und der H2-ICET weist eine unstetige Preisentwicklung auf, da der Preis sich aus dem des ICET und den Umbaukosten für das Wasserstoff-System zusammensetzt. Da nicht für jede Technologie eine ausreichende Datenlage für den Restwert der Nutzfahrzeuge vorliegt, wird eine Modellierung nach Kleiner und Friedrich verwendet, die durch Hausmann et al. erweitert wurde.^{2,3} In dieses Modell fließt der Technologiereifegrad sowie die Laufleistung mit ein. Letztere ergibt sich aus der Haltedauer und den durchschnittlich zurückgelegten Kilometern. Die Haltedauer wird auf fünf Jahre festgelegt. Für die durchschnittlich zurückgelegten Kilometer wird eine Normalverteilung angenommen und verschiedene Distanzen bewertet. In der folgenden Tabelle sind die Annahmen für den Aufbau des TCO-Modells festgehalten.^{4,5,6,7,8,9}

- 1 | e-mobil BW GmbH 2025.
- 2 | Florian Kleiner, Horst E. Friedrich, S. 5.
- 3 | Hausmann et al. 2025, S. 8–9.
- 4 | Günther et al. 2025, S. 7.
- 5 | Link und Steffen 2021, S. 4.
- 6 | Shoman et al. 2023, S. 2.
- 7 | Toll Collect GmbH 2024.
- 8 | Zoll.
- 9 | Hausmann et al. 2025, S. 8–9.



	„Business as usual“	Batterie-Fokus	Wasserstoff-Fokus	Quelle
Energiekosten	Der Diesel-Preis steigt durch EU-ETS2 um 42% bis 2035			Günther et al. 2025
	Depot-Anteile – Verteilerverkehr: 90% Linienverkehr: 50% Fernverkehr: 0%			Modellannahme
Verbrauch	Diesel-Effizienzsteigerung um 9% bis 2035 H2-ICE-Effizienzsteigerung um 4% bis 2035 FCET-Effizienzsteigerung um 3% bis 2035			Link et al.
	Keine BET-Effizienzsteigerung angenommen			Shoman et al.
Wartungskosten	Die Wartungskosten werden aus Hersteller-, Praxis- und Literaturdaten zu Wartungsintervallen und -umfängen abgeleitet			Kleiner und Friedrich
Maut	Mautbefreiung für ZET bis 2031			e-mobil BW
	Offizielle Mautsätze			Toll Collect
Steuer	> 1ct/km			Zoll
Anschaffungskosten	Aus den Emissionszielen der EU wird berechnet, wie viele ZET zugelassen werden müssen. Daraus entsteht mit Hilfe einer Lernkurve die Preisentwicklung für den FCET und den BET. Der Preis des H2-ICE setzt sich aus demjenigen des ICE und den Umbaukosten zusammen. Details im Text.			Eigene Berechnung
Wertverfall	Der Restwert wird mit Hilfe des Technologiereifegrades und der Laufleistung bestimmt.			Hausmann et al.
	Für FCET und BET wird kein Restwert angenommen.	Für FCET wird kein Restwert angenommen.	Für BET wird kein Restwert angenommen.	Modellannahme

Tabelle 1: Annahmen für den Aufbau des Gesamtbetriebskostenmodells

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Für die meisten Nutzfahrzeuge existieren keine Listenpreise wie bei PKW. Die Anschaffungskosten für die verschiedenen Technologien im Jahr 2025 sind Teil der eigenen Datenerhebung. Um die Entwicklung der Kosten zu beschreiben, wird eine Lernkurve modelliert, die den Hochlauf der Technologien beschreibt und so die Kostendegression einer Technologie durch Stückzahleffekte erfasst. Dazu wird zunächst ermittelt, wie viele ZET zugelassen werden müssen, um die Meilensteine der EU zu erreichen.¹ Die Lernkurve ist so parametrisiert, dass die Produktionskosten mit jeder Verdopplung des Produktionsvolumens um 20% zurückgehen.² Dabei handelt es sich

um eine Modellannahme, die nicht weiter untersucht wird. Zusätzlich wird eine Kaufprämie auf ZET-Technologien angewandt. Die Höhe dieser Kaufprämie ergibt sich aus der Strafzahlung, die der Hersteller beim Nichteinhalten der Flottengrenzwerte zahlen müsste.³ Für die Mautkosten werden für jedes Szenario die aktuell geltenden Sätze angenommen.⁴ In allen Szenarien gilt: Emissionsfreie Lkw sind bis einschließlich 2031 von der Maut befreit.⁵ Die Energiekosten entwickeln sich abhängig vom Szenario für Wasserstoff und Strom unterschiedlich. Für Diesel wird mit einer Preissteigerung von 42% bis 2035 gerechnet. Dieser Zuwachs im Dieselpreis ergibt sich

1 | Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, S. 12.
 2 | Hoekstra und Alkemade 2025, S. 2.
 3 | Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, S. 13.
 4 | Toll Collect GmbH 2024.
 5 | e-mobil BW GmbH 2025.

aus einer Steigerung der CO₂-Kosten durch die Einführung des Emissionshandelssystems ETS2 und einer vollständigen Umlegung der CO₂-Kosten auf den Diesel-Preis. Dazu wird angenommen, dass das Emittieren einer Tonne CO₂ im Jahr 2035 370 € kosten wird.¹ Die Wartungskosten werden nach Kleiner und Friedrich berechnet und für den gesamten Betrachtungszeitraum als konstant angenommen.² Für die Berechnung der Steuer werden die aktuellen Steuersätze herangezogen und es wird angenommen, dass diese nicht weiter verändert werden.³ Da der Einfluss der Fahrzeugsteuer auf den TCO geringfügig ist, wird hier kein komplexeres Modell erstellt und keine Unterscheidung nach den Szenarien getroffen.

Neben den Technologien und dem Bewertungsjahr wird auch zwischen den zuvor entwickelten Anwendungen (siehe Kapitel 4.1.2) unterschieden. Für jede dieser Anwendungen wird eine Normalverteilung der Tageskilometer angenommen und verschiedene Variationen berechnet. Dadurch kann zusätzlich untersucht werden, ob eine Variation der täglichen Strecke einen Einfluss auf die wirtschaftliche Attraktivität einer Technologie hat. Während Diesel und Wasserstoff in der Regel öffentlich bezogen werden, existiert beim Laden eines BET die Möglichkeit, dies lokal und aus eigener Quelle durchzuführen. Dieser Aspekt wird im Modell ebenfalls modelliert, da das Laden im Depot mit deutlich reduzierten Kosten einhergeht und den BET szenariounabhängig attraktiver macht. Es wird angenommen, dass im Verteilerverkehr zu 90 % im Depot geladen wird. Der Depot-Strom wird aus dem Netz entnommen

und mit 0,37 €/kWh angenommen. Diese Kosten setzen sich aus den Stromkosten sowie den Infrastrukturkosten für das Laden bis 50kW zusammen.⁴ Die restlichen 10 % der Energie werden durch öffentliche Ladesäulen mit mindestens 350 kW bezogen. Beim Linienverkehr wird zu 50 % im Depot geladen. Die verbleibenden 50 % werden öffentlich an Ladesäulen mit einer Leistung von mindestens 350 kW bezogen. Beim Fernverkehr wird zu 50 % an öffentlichen 350-kW-Ladesäulen und zu 50 % an öffentlichen Ladesäulen mit weniger als 350 kW geladen. Wird Strom im Depot geladen, wird dieser vollständig aus dem öffentlichen Netz bezogen.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Kosten und die Verbräuche, die dem Modell zugrunde liegen, aufgeführt.

1 | Günther et al. 2025.

2 | Florian Kleiner, Horst E. Friedrich, S. 8

3 | Zoll.

4 | Hacker und Gnann 2025, S. 11–12.

		„Business as usual“			
		ICE	BET	H2-ICE	FCET
Anschaffungskosten	2025	125.000 €	250.000 €	195.000 €	450.000 €
	2030	138.000 €	162.000 €	156.000 €	230.000 €
	2035	153.000 €	157.000 €	174.000 €	206.000 €
Energiekosten	2025	1,30 €	0,66 €	12,00 €	12,00 €
	2030	1,75 €	0,63 €	7,45 €	7,45 €
	2035	2,20 €	0,60 €	6,50 €	6,50 €
Energieverbrauch [l/100 km; kWh/100 km; kg/100 km; kg/100 km]	2025	27	100	10	8
	2030	26	96	9,3	7,5
	2035	25	91	8,7	7
		Batterie-Fokus			
		ICE	BET	H2-ICE	FCET
Anschaffungskosten	2025	125.000 €	250.000 €	195.000 €	450.000 €
	2030	138.000 €	150.000 €	156.000 €	230.000 €
	2035	153.000 €	145.000 €	174.000 €	206.000 €
Energiekosten	2025	1,30 €	0,66 €	12,00 €	12,00 €
	2030	1,75 €	0,63 €	7,45 €	7,45 €
	2035	2,20 €	0,60 €	6,50 €	6,50 €
Energieverbrauch [l/100 km; kWh/100 km; kg/100 km; kg/100 km]	2025	27	100	10	8
	2030	26	96	9,3	7,5
	2035	25	91	8,7	7
		Wasserstoff-Fokus			
		ICE	BET	H2-ICE	FCET
Anschaffungskosten	2025	125.000 €	250.000 €	195.000 €	450.000 €
	2030	138.000 €	162.000 €	136.000 €	212.000 €
	2035	153.000 €	157.000 €	161.000 €	190.000 €
Energiekosten	2025	1,30 €	0,66 €	12,00 €	12,00 €
	2030	1,75 €	0,63 €	7,00 €	7,00 €
	2035	2,20 €	0,60 €	5,50 €	5,50 €
Energieverbrauch [l/100 km; kWh/100 km; kg/100 km; kg/100 km]	2025	27	100	10	8
	2030	26	96	9,3	7,5
	2035	25	91	8,7	7

Quelle: eigenes Modell PEM, 2026

Tabelle 2: Ausgewählte Kosten (Netto) und Verbräuche für alle Szenarien für den Fernverkehr

4.2.3 Auswertung des Gesamtbetriebskostenmodells

Das entwickelte Gesamtbetriebskostenmodell zeigt auf, welche Kosten mit den einzelnen Technologien verbunden sind und gibt so Aufschluss über die Wirtschaftlichkeit und die Wahrscheinlichkeit, mit der sich einzelne Technologien durchsetzen werden. Es wird nicht eine Technologie existieren, die für alle Anwendungsszenarien optimal ist. Daher ist es notwendig, eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Szenarien und Anwendungsfälle durchzuführen. Dazu wird im Folgen-

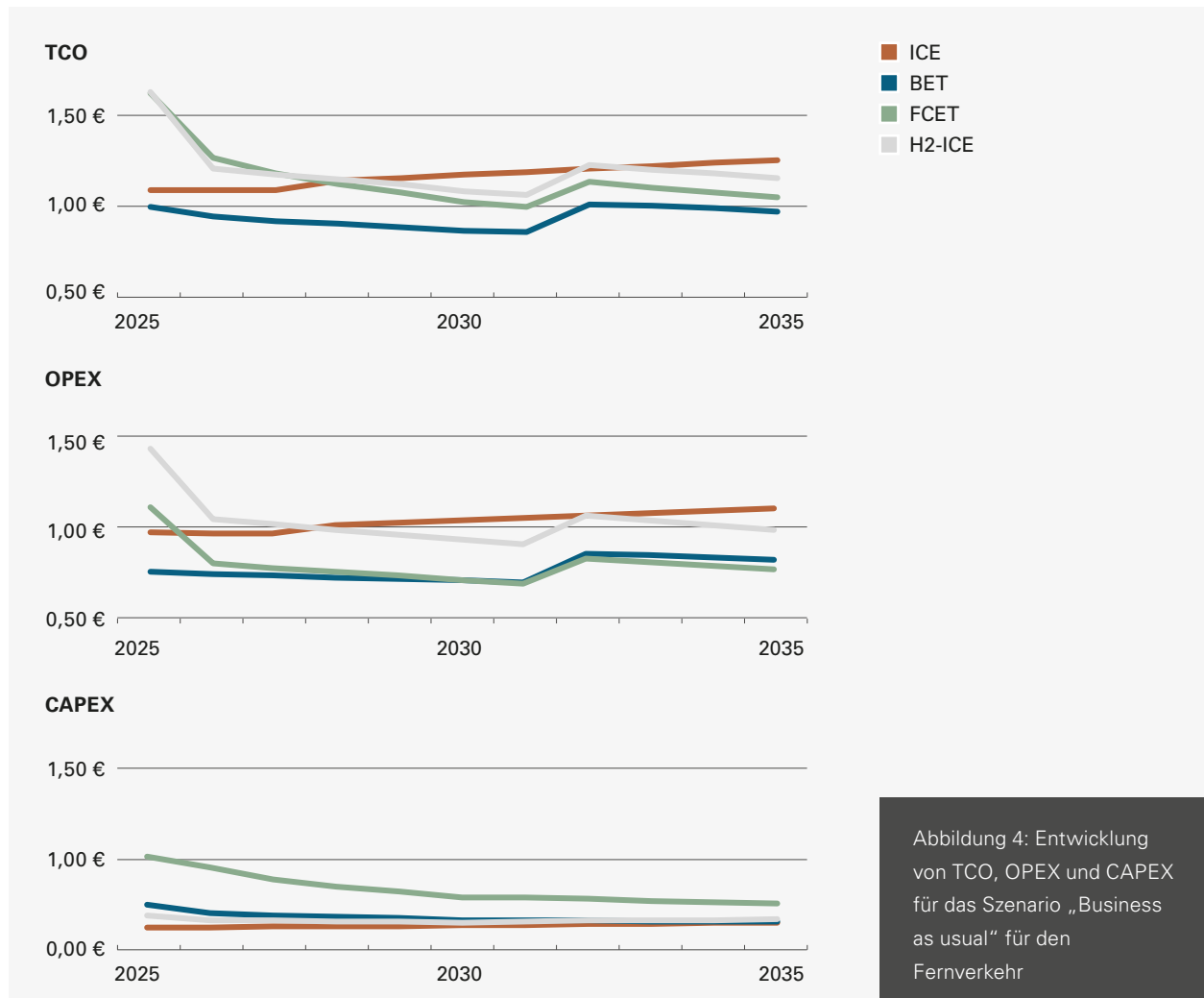
den die Entwicklung der Gesamtbetriebskosten betrachtet. Diese wird sowohl für die verschiedenen Szenarien als auch für die unterschiedlichen Anwendungsfälle durchgeführt. Im Anschluss wird analysiert, welche Komponenten der Gesamtbetriebskosten den größten Einfluss haben und wieso sich bestimmte Technologien durchsetzen werden. Aus dieser Analyse wird im Anschluss abgeleitet, welche Tendenzen für die Zulassungszahlen bis 2035 gelten.

Entwicklung der Gesamtbetriebskosten bis 2035

In Abbildung 4 sind die Gesamtbetriebskosten für das Szenario „Business as usual“ für den Fernverkehr für die Jahre 2025 bis 2035 dargestellt. Für diese Auswertung wurde eine Jahreslaufleistung von 175.000 Kilometern angenommen, was 700 Tageskilometern entspricht. Dies ist auch der Mittelwert der normalverteilten Tageskilometer im Fernverkehr.

Durch die Abbildung 4 wird deutlich, dass der ICET bereits ab 2026 im Fernverkehr nicht mehr die wirtschaftlichste Technologie ist. ICET werden in den kommenden Jahren aus wirtschaftlicher Sicht immer weiter an Relevanz verlieren. Obwohl die CAPEX beim Diesel bis 2035 auf einem niedrigeren Niveau liegen, wird diese Antriebstechnologie wegen der hohen OPEX zunehmend unattraktiv. An dieser Stelle ist hervorzuheben,

dass der Sprung in den OPEX im Jahr 2032 durch den Entfall der Mautbefreiung zustande kommt. BET sind mit diesen Modellannahmen bereits ab 2026 die günstigste Technologie. Dies kommt durch moderate CAPEX, aber insbesondere durch niedrige OPEX zustande. Die beiden Wasserstofftechnologien FCET und H2-ICET kommen in diesem Szenario nicht auf das Niveau der günstigsten Technologie. FCET sind durch die hohen CAPEX und gleichzeitig hohen OPEX eine wenig relevante Technologie in diesem Szenario. Die H2-ICET weisen zwar geringere CAPEX auf, sind allerdings ebenfalls durch hohe OPEX ausgezeichnet, weshalb auch diese Technologie im betrachteten Szenario nicht relevant ist.

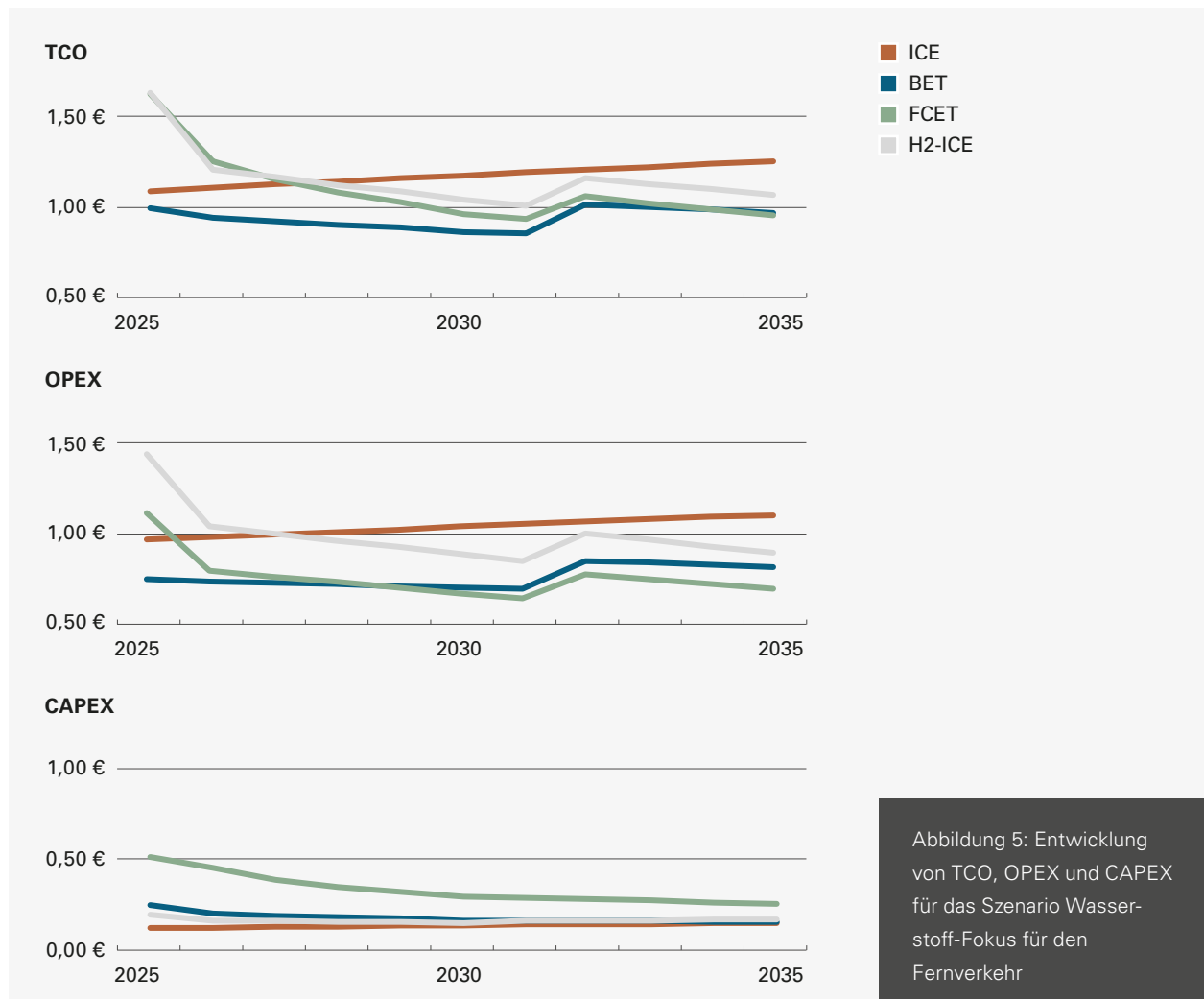


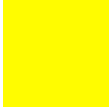


Durch die Analyse der Gesamtbetriebskosten im Business-as-Usual-Szenario zeigt sich, dass die Wasserstoff-Technologien im betrachteten Zeitraum die höchsten Kosten verursachen und mit diesen Modellannahmen erst gegen Ende des Betrachtungszeitraums in den Bereich der Diesel-Kostenparität gelangen, sodass kurzfristig von einer begrenzten wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit auszugehen ist. Daher wird das Szenario Wasserstoff-Fokus analysiert, wodurch klar wird, welche Maßnahmen zu einer Attraktivitätssteigerung der Wasserstofftechnologien notwendig sind. Die Entwicklungen der TCO, OPEX und CAPEX sind in der folgenden Abbildung 5 dargestellt. Für die Wasserstoff-Technologien wird ein großer Sprung der TCO in den ersten Jahren angenommen. Dieser

Sprung entsteht einerseits durch die schnell sinkenden Wasserstoffpreise und andererseits durch die Annahme, dass die Fahrzeuge günstiger werden. Der Preisrückgang der Wasserstoff-Fahrzeuge entsteht dadurch, dass angenommen wird, dass die geringen Stückzahlen (148 Wasserstoff-Lkw in 2025)¹ sich schneller vervielfachen als die der anderen Technologien.

1 | NOW GmbH 2026.





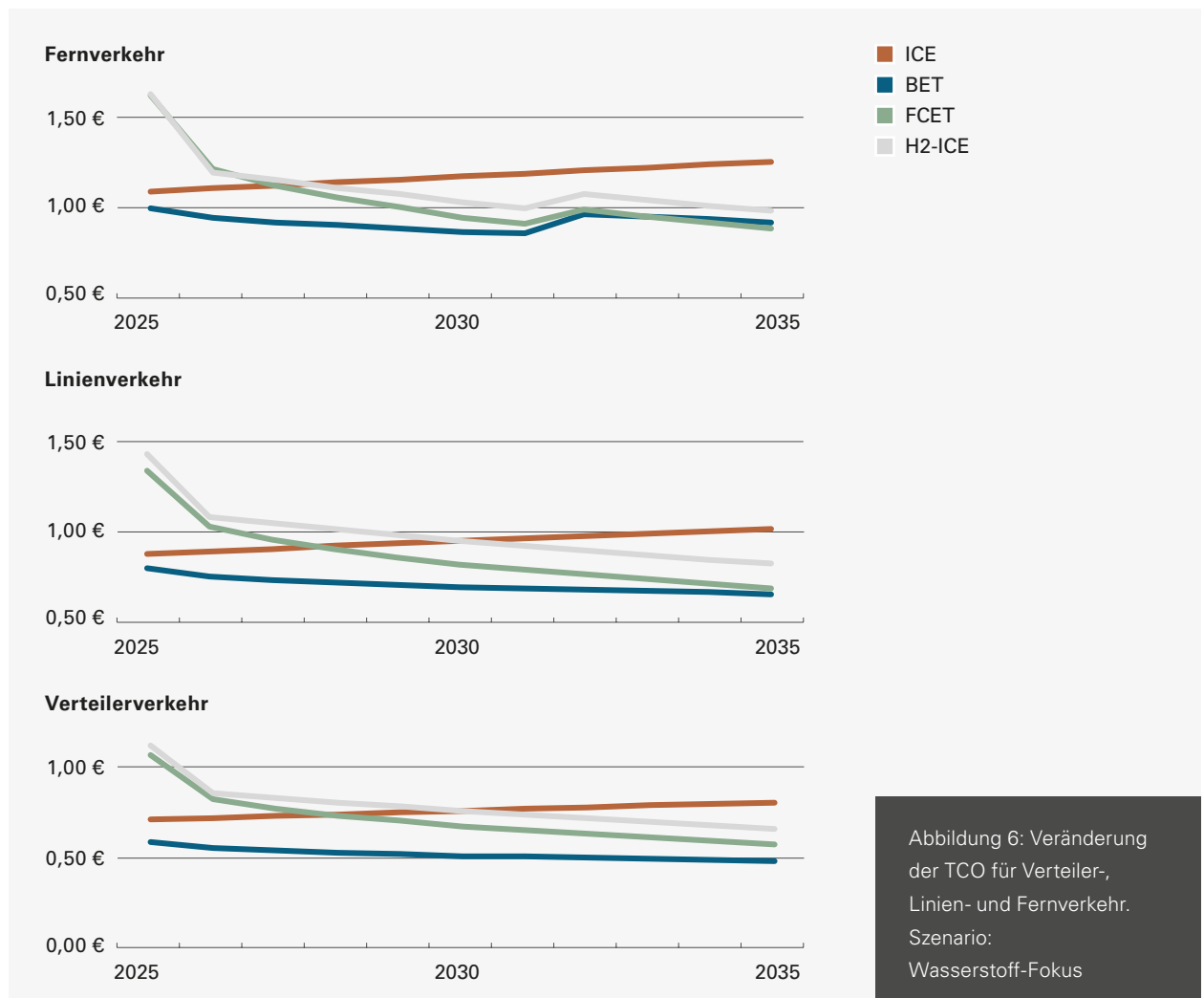
Konventionelle Lkw mit ICET folgen in dieser Auswertung dem gleichen Verlauf, da in dem Szenario keine Anpassung für ICET integriert wird. Auch die Entwicklung des TCO für die BET bleibt unverändert. Die Wasserstoff-Technologien kommen auf ein deutlich niedrigeres Kostenniveau und sind in diesem Szenario ab 2029 nur 5 % teurer (FCET) beziehungsweise 10 % teurer (H2-ICET) als die günstigste Technologie BET. Damit wären diese Technologien konkurrenzfähig. Die Betrachtung des Szenarios Batterie-Fokus bringt keine zusätzliche Erkenntnis, da BET auch im Szenario „Business as usual“ bereits die wirtschaftlichste Lösung ist.

Aus den Daten folgt, dass der BET in allen Szenarien bis 2029 die wirtschaftlichste Technologie darstellt. Ob die Wasserstofftechnologien relevant werden, hängt von der genauen Entwicklung der CAPEX und OPEX ab. Eine sichere Aussage kann aufgrund der geringen Differenzen ab dem Jahr 2029

nicht mehr getroffen werden. Der ICET wird in jedem Szenario stetig unwirtschaftlicher.

Einfluss der Anwendungsfälle auf den TCO

Die TCO-Rankings zeigen, welche Technologie in den jeweiligen Jahren wirtschaftlich vorteilhaft ist. Um die Gründe dieser Rangfolge nachvollziehbar zu machen, wird im nächsten Schritt die Zusammensetzung der TCO nach Kostenkomponenten (CAPEX, Energie, Wartung, Maut, Steuer) aufgeschlüsselt. Es wird betrachtet, welchen Einfluss die drei Anwendungsfälle Verteiler-, Linien- und Fernverkehr auf die Entwicklung der TCO haben. Die Unterschiede liegen für diese Szenarien im Zugang zum Depot-Laden sowie unterschiedlichen durchschnittlichen Tageskilometern. In der Abbildung 6 sind die TCO für die drei Anwendungsfälle Verteiler-, Linien- und Fernverkehr abgebildet.



Quelle: eigene Darstellung, PEM 2026

Abbildung 6: Veränderung der TCO für Verteiler-, Linien- und Fernverkehr. Szenario: Wasserstoff-Fokus

Die Gesamtbetriebskosten steigen vom Verteilerverkehr über den Linienverkehr zum Fernverkehr stetig weiter an. Darüber hinaus rücken der BET und die Wasserstofftechnologien ebenfalls mit zunehmender Fahrzeuggröße in ein engeres Band. Mit steigenden Tageskilometern und größeren Nutzfahrzeugen wird eine Entscheidung dahingehend, welche Technologie die wirtschaftlichste ist, folglich zunehmend schwieriger. Konventionelle Nutzfahrzeuge (ICET) weisen im Rahmen dieser Analyse stetig steigende Gesamtbetriebskosten auf. Das deutet darauf hin, dass die Bedeutung des ICET abnehmen wird. Wichtig ist allerdings anzumerken, dass die Infrastruktur ebenfalls einen Einfluss auf die Marktdurchdringung einer Technologie hat. Für BET ist die inverse Beziehung zwischen verfügbarer Depot-Ladeinfrastruktur und TCO-Vorteil des BET hervorzuheben. Im Verteilerverkehr mit einem hohen Ladeanteil im Depot erreicht der BET sein maximales wirtschaftliches Potential, während der Fernverkehr ohne Zugang zum Depot-Laden weniger von einem batterieelektrischen Antrieb profitiert. Würde im Depot Strom für einen Preis unter dem des Netzstroms (beispielsweise durch eine PV-Anlage) bezogen werden, würde die Attraktivität des BET noch weiter steigen. Der Zugang zum Depot-Laden ist nicht nur abhängig vom Anwendungsfall, sondern auch von dem Unternehmen, das die Fahrzeuge einsetzt. Daher wird der Depot-Anteil ebenfalls in die Sensitivitätsanalyse aufgenommen.

Aus Abbildung 4 und Abbildung 5 wird deutlich, dass die TCO sich zu großen Teilen aus den OPEX zusammensetzt. Die CAPEX spielen eine untergeordnete Rolle. Daher ist es von besonderem Interesse, zu verstehen, wie die OPEX sich zusammensetzen und welche Faktoren besonders relevant sind. In Abbildung 7 ist die Entwicklung der TCO für die vier relevanten Technologien bis 2035 nach den Komponenten aufgeschlüsselt. Die Grafik beinhaltet die Daten für den Fernverkehr.

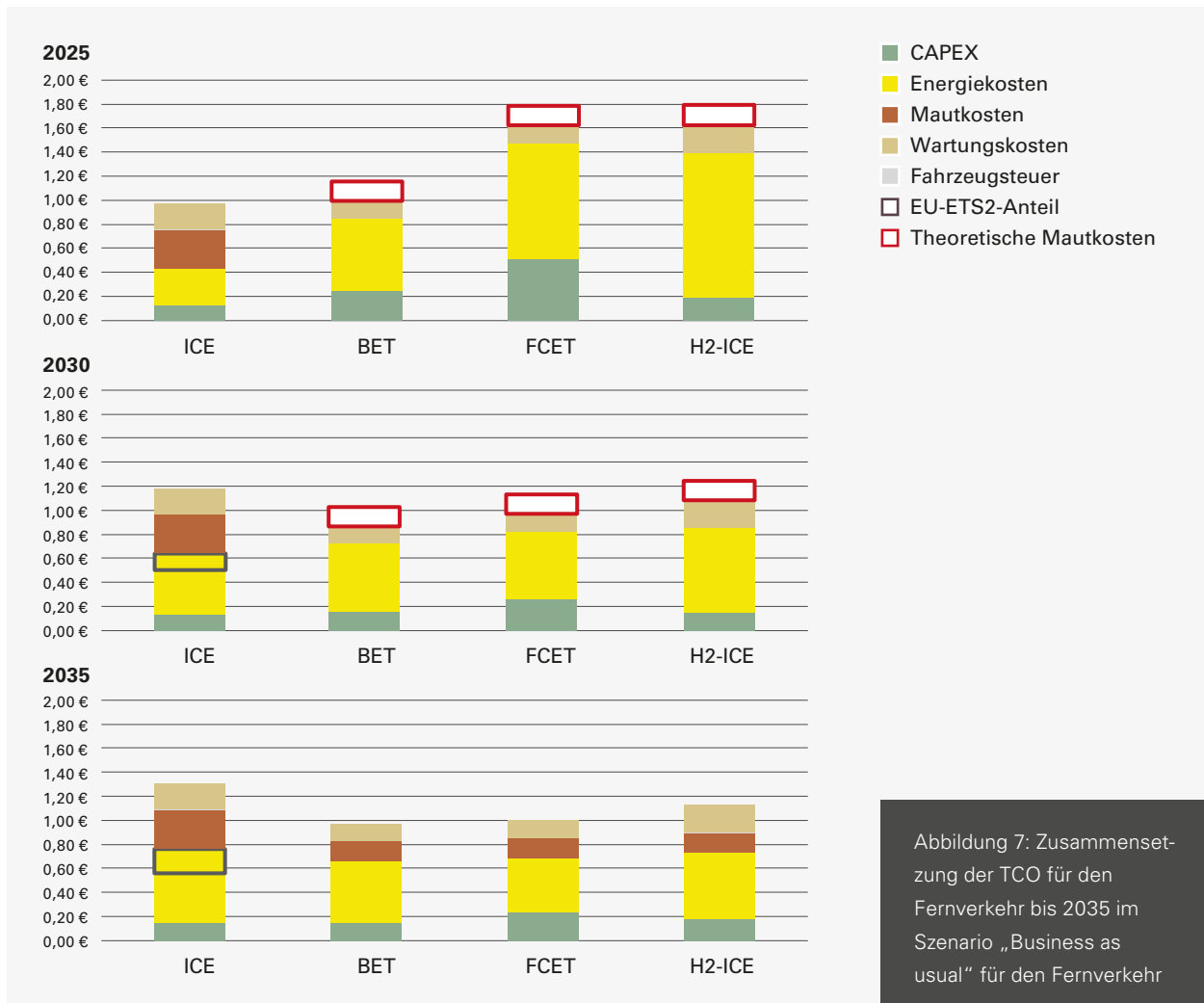


Abbildung 7: Zusammensetzung der TCO für den Fernverkehr bis 2035 im Szenario „Business as usual“ für den Fernverkehr

Durch diese Darstellung wird deutlich, dass der ICET im Jahr 2025 die niedrigsten Anschaffungskosten und die niedrigsten Energiekosten aufweist. Erst durch die Beaufschlagung der Mautkosten und der etwas höheren Wartungskosten wird diese Technologie weniger attraktiv. Würden die Mautkosten für alle Technologien gleich angesetzt werden (abgesehen von der CO₂-Steuer, die nur auf den ICET angerechnet wird), würde sich um das Jahr 2030 ein kleinerer Unterschied zwischen den Technologien abzeichnen. Somit würden BET und FCET erst nach 2030 wettbewerbsfähig, wenn sie geringere Investitions- und Betriebskosten aufweisen. Ebenso hat der Emissionshandel einen negativen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit des ICET. Die H2-ICET-Technologie zeigt sich längerfristig be-

nachteiligt, da ihr Wirkungsgrad (Wasserstoff bis Rad) unter dem der FCET liegt und hohe Wasserstoffkosten nicht durch die niedrigeren CAPEX kompensiert werden.¹ In den Jahren 2025-2030 ist der H2-ICET wenig attraktiv wegen der hohen Wasserstoffkosten. In den Jahren 2031-2035 ist der H2-ICET wenig attraktiv wegen der CAPEX. Der TCO der Wasserstofftechnologien ist im Jahr 2025 von einem großen Anteil der Energiekosten geprägt. Damit diese Technologien konkurrenzfähig werden, ist eine Reduktion des Wasserstoffpreises notwendig. Der ICET wäre länger konkurrenzfähig, wenn BET, FCET und H2-ICET nicht von der Maut befreit wären und der Emissionshandel den Diesel-Preis nicht beeinflussen würde.

1 | Durkin et al. 2024, S. 11.

Entwicklung der Zulassungszahlen verschiedener Technologien

Für die Prognose der Zulassungszahlen der verschiedenen Technologien sind die Gesamtbetriebskosten ein wichtiger Baustein. Die Entscheidung über die Technologie eines Fahrzeuges wird allerdings nicht ausschließlich auf Basis der hier ermittelten Einflüsse getroffen. Der Zugang zum Depot-Laden ist ein wichtiger Einflussfaktor. Darüber hinaus spielen die Anschaffungskosten in der Realität eine wichtige Rolle, da das Kapital verfügbar sein muss oder Mehrkosten für die Zinsen entstehen. Ebenso spielt die Infrastruktur entlang der zu befahrenden Routen eine Rolle. Zur Prognose der Zulassungszahlen müssen diese Faktoren einbezogen werden. Das geschieht über zwei Mechanismen. Für jedes Jahr werden die Gesamtbetriebskosten für alle Technologien berechnet. Anschließend wird der Technologiemix für dieses Jahr bestimmt. Im Rahmen des hier diskutierten Modells wird dazu die Technologie mit den geringsten Gesamtbetriebskosten am häufigsten zugelassen. Je teurer die anderen Technologien sind, desto geringer ist deren Anteil in den Gesamtzulassungen. Der zweite Mechanismus, der verwendet wird, um eine Prognose der Zulassungszahlen zu erstellen, ist ein Diffusionsmodell, das die Adaption neuer Technologien abbildet. Es ist bekannt, dass neue Technologien schrittweise adaptiert werden. Zuerst wird nur ein geringer Anteil der Marktteilnehmer eine neue Technologie erproben wollen. Im Laufe der Zeit entscheiden

sich zunehmend mehr Marktteilnehmer dazu, neue Technologien zu verwenden. Typischerweise folgt die Adaption einer Normalverteilung. Dieses Wissen wird genutzt, um einen Übergang vom Status quo hin zu einer Entscheidung gemäß der Gesamtbetriebskosten zu modellieren. Das Adaptionmodell wird nach Rogers umgesetzt und die Adaptionrate folgt einer S-Kurve. Die Parameter dieser S-Kurve werden so angepasst, dass der Hochlauf der BET zwischen 2024 und 2025 abgebildet wird.¹ Der Aufbau des Modells für die Prognose der Zulassungszahlen ist in der folgenden Abbildung 8 dargestellt.

1 | Karnowski und Kumpel 2016, S. 102.

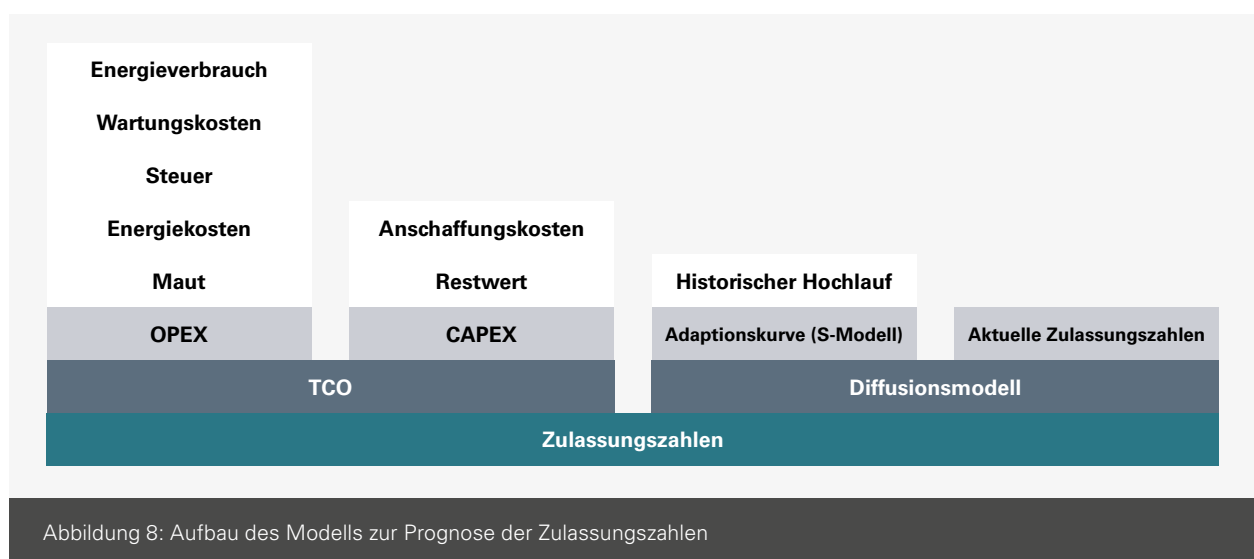
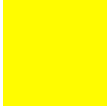


Abbildung 8: Aufbau des Modells zur Prognose der Zulassungszahlen



Prognose für das Szenario „Business as usual“

In der folgenden Abbildung 9 ist die Prognose bezüglich der Zusammensetzung der Neuzulassungen für das Szenario „Business as usual“ abgebildet.

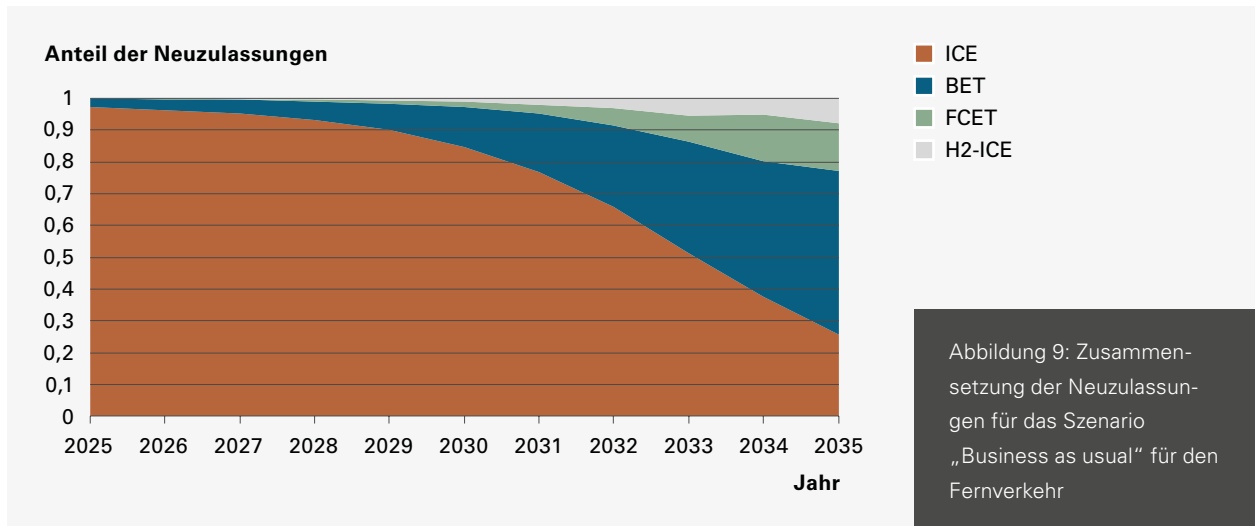


Abbildung 9: Zusammensetzung der Neuzulassungen für das Szenario „Business as usual“ für den Fernverkehr

Für das entwickelte Szenario „Business as usual“ zeigt sich, dass der ICET wegen der abnehmenden Konkurrenzfähigkeit weniger zugelassen wird. Der H2-ICET ist erst wegen der hohen OPEX unattraktiv und kann sich später gegenüber FCET und BET nicht durchsetzen. Daher werden die Zulassungszahlen im Rahmen dieser Modellierung gering eingeschätzt. Ein anderes Bild zeigt sich für den BET. Dieser wird wegen der zunehmenden wirtschaftlichen Attraktivität vermutlich einen relevanten Marktanteil erlangen. Der FCET zeigt sich in diesem Szenario als eine Technologie, die erst spät an Relevanz gewinnt, aber einen bedeutenden Marktanteil aufbaut. Bemerkenswert ist der globale Trend: Eine Abkehr vom ICET und ein Aufkommen der ZET, wobei diese Technologien wahrscheinlich parallel existieren werden.

Prognose für das Szenario Wasserstoff-Fokus

Nun wird die Prognose bezüglich der Zusammensetzung der Zulassungen für den Wasserstoff-Fokus dargestellt (Abbildung 10).

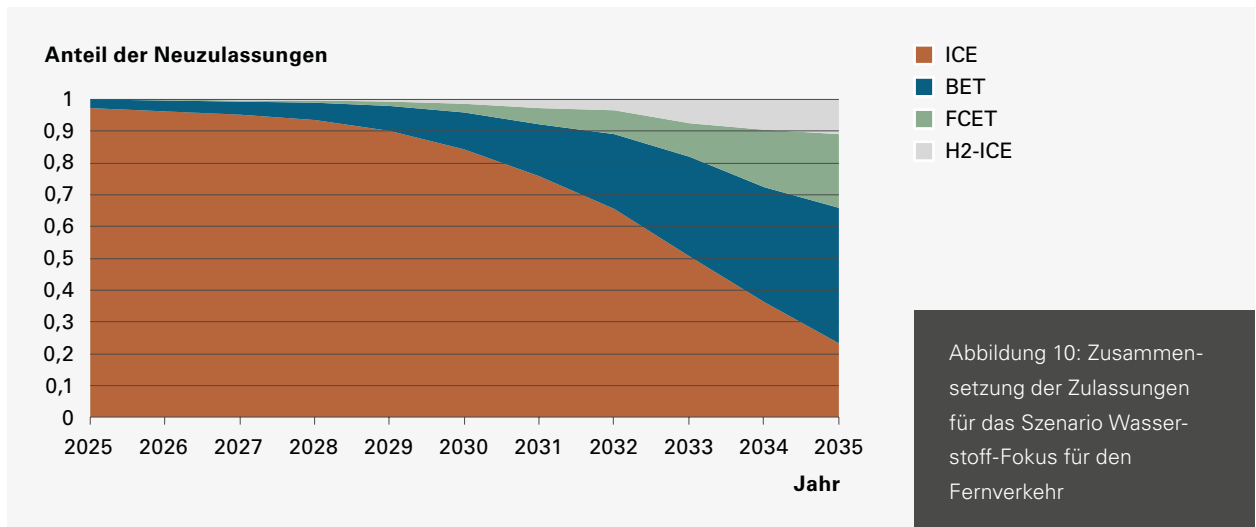
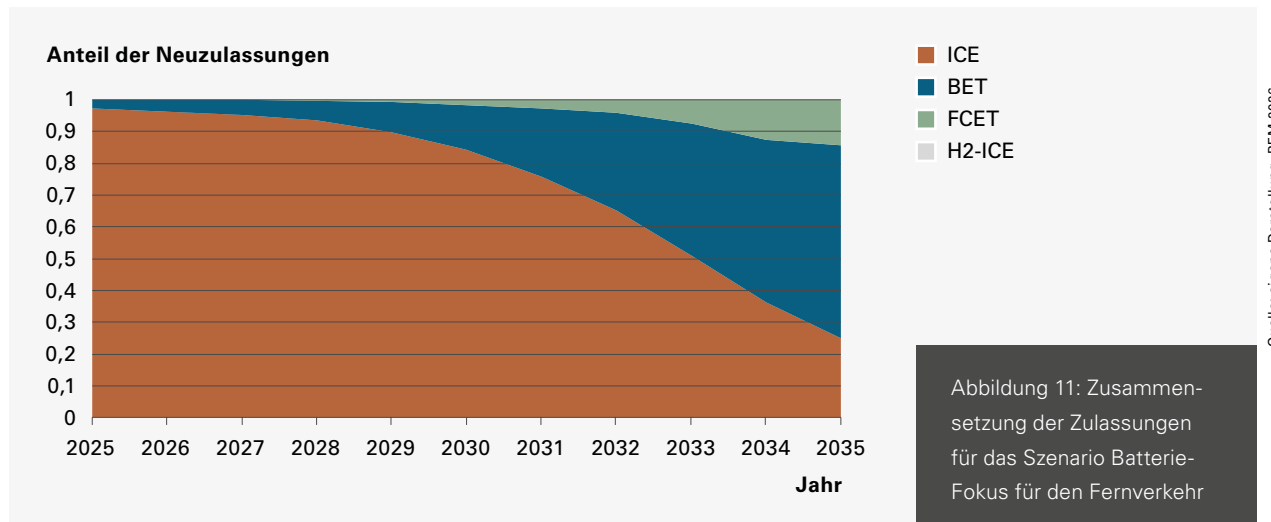


Abbildung 10: Zusammensetzung der Zulassungen für das Szenario Wasserstoff-Fokus für den Fernverkehr

Für dieses Szenario lässt sich der gleiche Trend erkennen. Auch hier nimmt der Anteil der ICET-Zulassungen stetig ab und wird durch ZET ersetzt. Anders als im Szenario „Business as usual“ ist der Anteil des BET allerdings etwas geringer und die Wasserstofftechnologien gewinnen an Relevanz. Dennoch werden die Marktanteile von FCET und H2-ICET auch in diesem Szenario nur langsam aufgebaut.

Prognose für das Szenario Batterie-Fokus

Die Prognose hinsichtlich der Verteilung der Zulassungen wird ebenfalls durchgeführt und ist in der Abbildung 11 festgehalten.



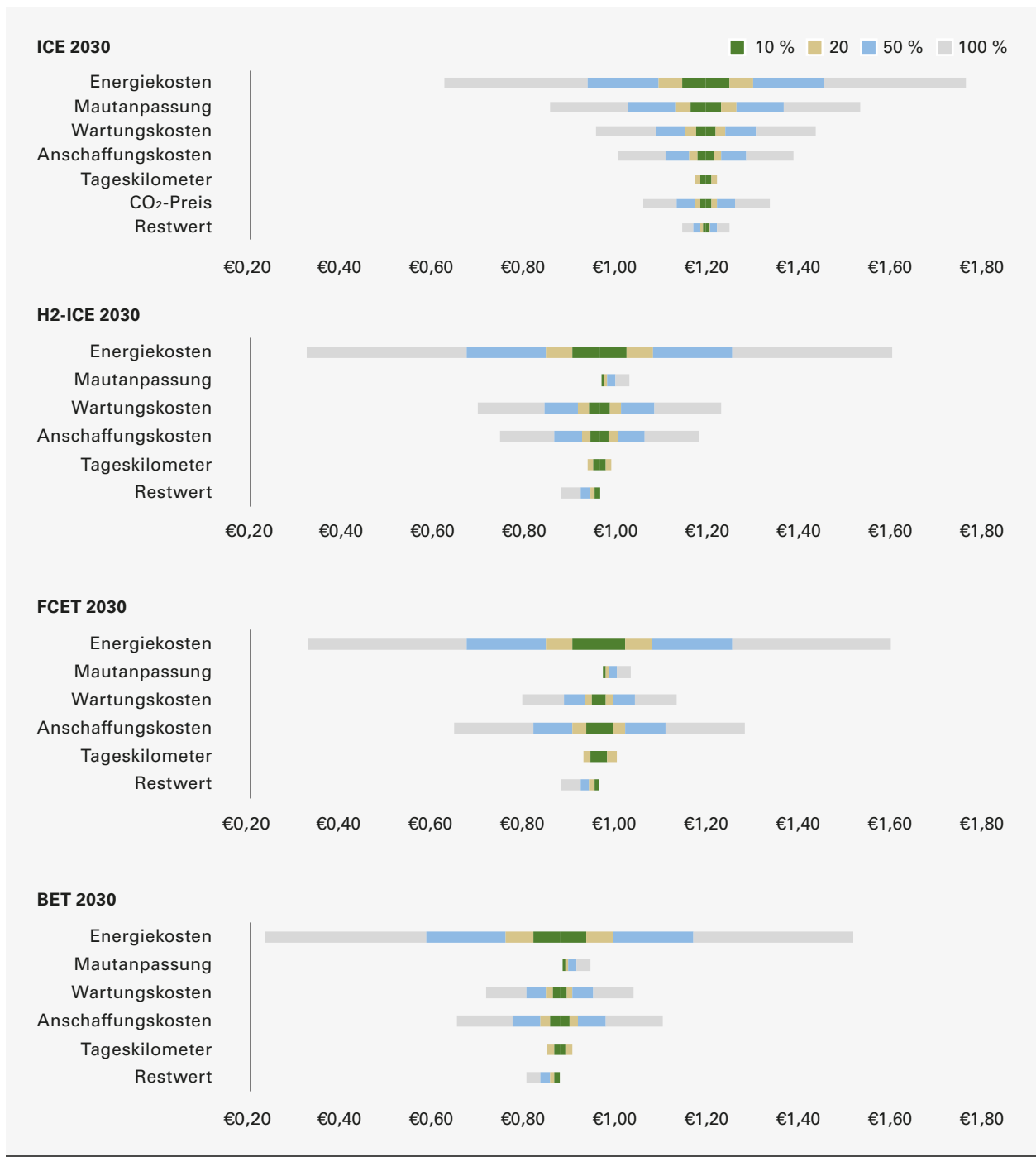
Hier zeigt sich ebenfalls der Trend in Richtung der ZET. Durch die geringeren Kosten des BET kann dieser mit den getroffenen Modellannahmen einen noch größeren Marktanteil erlangen. Der H2-ICET wird in diesem Szenario vollständig verdrängt. Wegen der höheren Effizienz des FCET gegenüber dem H2-ICET kann der FCET aber neben BET und ICET einen Marktanteil erlangen.



Sensitivitätsanalyse

Die bisherigen Ergebnisse basieren auf einem definierten Satz von Annahmen zu Preisen, Verbräuchen und Förderinstrumenten. Um die Robustheit der Schlussfolgerungen zu prüfen und die wichtigsten Kostentreiber zu identifizieren, wird im nächsten Schritt eine Sensitivitätsanalyse zentraler Modellparameter durchgeführt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

wird nun ermittelt, welche Parameter die wichtigsten sind, um Änderungen in den Gesamtbetriebskosten hervorzurufen. Diese Informationen geben einen Aufschluss darüber, wo Förderungen ansetzen können und welche Kosten besonders relevant für die Betreiber von Nutzfahrzeugen sind. In der folgenden Abbildung 12 sind die Sensitivitäten der vier diskutierten Technologien für das Jahr 2030 im Szenario „Business as usual“ für den Fernverkehr abgebildet.



Quelle: eigene Darstellung, PEM 2026

Abbildung 12: Sensitivitäten ausgewählter Modellparameter für das Jahr 2030 für das Szenario „Business as usual“ für den Fernverkehr

In der Abbildung sind die Sensitivitäten der Energiekosten, der Maut, der Wartungskosten, der Anschaffungskosten, der Tageskilometer, des CO₂-Preises und des Restwerts abgebildet. Für die Betrachtung wurde das Jahr 2030 ausgewählt. Die Kosten sind nach der Sensitivität des ICET geordnet. Die Abbildung zeigt je Antriebsoption eine Sensitivität der Gesamtbetriebskosten pro Kilometer: Auf der x-Achse steht der resultierende Kostenwert in €/km, und pro Zeile wird jeweils ein Eingangsparameter variiert. Der dunkelblaue zentrale Balken markiert den Referenzwert der Kosten; von dort aus sieht man, wie sich der Ergebniswert verschiebt, wenn man den jeweiligen Parameter ändert. Die unterschiedlich hellen Blau-/Grau-Segmente stehen für verschiedene Änderungsumfänge. Je weiter ein Segment vom Referenzwert abweicht, desto stärker ändert sich das Ergebnis bei dieser Parameteränderung. Die Balkenlänge einer Zeile ist damit ein Maß für die Sensitivität. Es ist klar zu erkennen, dass die Energiekosten der größte Hebel für eine Veränderung der Gesamtkosten sind. An zweiter Stelle folgen die Mautkosten und sind damit der zweitwichtigste Kostentreiber für die Gesamtwirtschaftlichkeit. Die Mautkosten sind beim ICET besonders relevant, da der ICET als einzige Technologie einen CO₂-Anteil in den Mautkosten aufweist. Die Wartungs- und Anschaffungskosten folgen danach. Eine Änderung der Tageskilometer hat einen Inversen Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten. Werden die Tageskilometer erhöht, sinken die kilometerspezifischen Gesamtbetriebskosten. Bei einer Reduktion der Tageskilometer steigen sie, da der Anteil der CAPEX größer wird. Daher sind bei der Sensitivität der Tageskilometer auch keine Änderungen über 50 % und 100 % aufgetragen. Der CO₂-Preis spielt eine untergeordnete Rolle, ist aber dennoch relevant, da er einer großen Ungewissheit unterliegt und große Abweichungen von der Modellannahme realistisch sind. Die Veränderung des Restwerts spielt für den ICET die kleinste Rolle.

Auch für den H2-ICET sind die Energiekosten der wichtigste Parameter. Dies offenbart die starke Abhängigkeit der Wasserstoff-Technologien vom Wasserstoffpreis. Eine Veränderung des Wasserstoffpreises kann die Wasserstoff-Technologien ermöglichen oder blockieren. Daher ist ein zuverlässig günstiger Wasserstoff Preis eine wichtige Voraussetzung für den H2-ICET und den FCET. Würde der im Jahr 2030 geltende Maut-Erlass für die ZET zurückgenommen werden, würde ein Teil des sicheren Vorteils gegenüber dem ICET verloren gehen. Wartungs- und Anschaffungskosten sind vergleichbar wichtige Faktoren für die Veränderung der Gesamtbetriebskosten des H2-ICET. Ein wichtiger Faktor der ZET ist der Restwert. Aktuell existiert kein Zweitmarkt für die ZET, weshalb ein

entstehender Zweitmarkt für die Gesamtbetriebskosten ein entscheidender Faktor ist. Ein sicherer Verkauf der Fahrzeuge würde die Gesamtbetriebskosten weiter senken.

Für den FCET ist besonders hervorzuheben, dass neben den Energiekosten auch die Anschaffungskosten weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Die Wartungskosten liegen zusammen mit denen des BET auf einem niedrigeren Niveau als bei ICET und H2-ICET.

Der BET weist eine starke Sensitivität der Gesamtbetriebskosten gegenüber den Energiekosten auf. Daher ist der Zugang zum Depot-Laden für Betreiber von BET besonders interessant. Die Sensitivität gegenüber den Anschaffungskosten ist ebenfalls relevant und kann einen entscheidenden Unterschied für die Betreiber machen. Auch hier ist die Bildung eines Zweitmarkts interessant, um die Gesamtbetriebskosten weiter zu reduzieren.

Zentrale Erkenntnisse der TCO-Analyse

- Die OPEX (insbesondere Energiekosten) dominieren die Gesamtbetriebskosten über alle Szenarien hinweg.
- BET sind über alle Szenarien hinweg die günstigste Technologie ab 2026.
- Sinkende Wasserstoffpreise sind die zentrale Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit von FCET und H2-ICE.

Einordnung der Ergebnisse

Der tatsächliche Technologiemarkt in den Neuzulassungen kann von den Prognosen abweichen. Gründe hierfür liegen teilweise außerhalb der in der Gesamtbetriebskostenanalyse (TCO) abgebildeten Annahmen:

- **Infrastrukturverfügbarkeit und -auslastung:** Es ist nicht eindeutig, wie viele Nutzfahrzeuge durch Lade- und Wasserstoffinfrastruktur tatsächlich versorgt werden können. Eine überlastete Ladeinfrastruktur kann zu erhöhten Standzeiten führen und dadurch die Attraktivität von BET, FCET und H2-ICET senken.
- **Betrieb außerhalb ausgebauter Korridore:** Ein höherer Anteil an ICET-Zulassungen ist plausibel, wenn Fahrzeuge häufig außerhalb der Routen eingesetzt werden, die bereits für BET- und Wasserstoff-Fahrzeuge geeignet ausgebaut sind.
- **Investitionskosten und Preisannahmen:** Der Einsatz von FCET und H2-ICET setzt sinkende CAPEX sowie insbesondere sinkende Wasserstoffpreise voraus. Sollten die Preise nicht wie erwartet auf 6-8 €/kg fallen, werden FCET und H2-ICET voraussichtlich weniger relevant als in den Ergebnissen dargestellt.
- **Marktentwicklung und Technologieverfügbarkeit:** Wenn nur ein kleiner Markt für H2-ICET erwartet wird, könnte eine (Weiter-)Entwicklung ausbleiben, was die reale Marktdurchdringung zusätzlich begrenzt.
- **Entscheidungsverhalten der Betreiber (nicht nur TCO):** Technologieentscheidungen werden nicht ausschließlich auf Basis der TCO getroffen. Es ist zu erwarten, dass konservative oder risikoaverse Entscheidungen kurzfristig zu weiteren Zulassungen von ICET-Nutzfahrzeugen führen.
- **Energiepolitik und Energiekosten:** Änderungen der Energiekosten (z. B. durch Besteuerung, Abgaben oder Förderung von Ladestrom, Wasserstoff oder Diesel) können die relativen Betriebskosten und damit die Attraktivität der Technologien deutlich verschieben.

- **Maut und Regulierung:** Anpassungen der Mautsätze (z. B. CO₂-Differenzierung) haben einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Durchsetzungsfähigkeit des jeweiligen Antriebs.

- **Weitere politische Lenkungsentscheidungen:** EU und Mitgliedstaaten können zusätzliche Maßnahmen setzen (z. B. Abgaben auf Ladestrom oder gezielte Förderprogramme), welche die Ergebnisse in der Praxis verändern.

Vor diesem Hintergrund sind die dargestellten Marktanteile als TCO-basierte Einordnung unter den getroffenen Annahmen zu verstehen. Sie bilden primär die relative Technologieattraktivität und eine plausible Bandbreite ab und können sich bei abweichenden Rahmenbedingungen entsprechend verschieben.

05

Wertschöpfungspotenziale in Baden-Württemberg

05

Wertschöpfungspotenziale in Baden-Württemberg

In Kapitel 5 werden die Wertschöpfungspotenziale der Antriebswende in Baden-Württemberg untersucht. Im Mittelpunkt steht die Frage, welche zentralen Komponenten entlang des Antriebsstrangs für die regionale Industrie besonders relevant sind, wie sich Wertschöpfungsketten hierarchisch und geografisch verändern und welche Kompetenzen für die Fertigung alternativer Antriebstechnologien erforderlich sind. Darauf aufbauend wird analysiert, in welchem Umfang diese Kompetenzen bereits im Land vorhanden sind, wo neue Geschäftsfelder insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen entstehen und wie sich die parallele Entwicklung unterschiedlicher Antriebsstränge auf Investitionen und Produktionsstrukturen auswirkt. Zudem wird bewertet, ob eine strategische Diversifikation der Antriebstechnologien eher Chance oder Risiko für Unternehmen in Baden-Württemberg darstellt.

Methodisch werden in dem Kapitel mehrere komplementäre Analyseschritte kombiniert. In Abschnitt 5.1 erfolgt eine detaillierte Stücklistenanalyse exemplarischer Nutzfahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor im Vergleich zu batterieelektrischen, brennstoffzellenbasierten und wasserstoffverbrennungsmotorischen Antriebskonzepten. Aus den resultierenden Stücklisten werden Veränderungen in Bauteilstruktur, Fertigungsprozessen und Kostenanteilen der Bauteilgruppen abgeleitet. In Abschnitt 5.2 werden diese Ergebnisse in eine Darstellung der Wertschöpfungsentwicklung überführt, indem Wertschöpfungstiefen, Prozessketten und deren geografische Verortung für die Schlüsselkomponenten der Antriebswende analysiert und potenzielle neue Wertschöpfungsfelder identifiziert werden. Darauf aufbauend untersucht Abschnitt 5.3 im Rahmen einer Kompetenz-Gap-Analyse für die zentralen Technologiebausteine Verbrennungsmotor, Batterie, Elektromotor, Brennstoffzelle und Wasserstoff-Verbrennungsmotor, in welchem Umfang die in Baden-Württemberg vorhandenen Kompetenzen die Anforderungen der neuen Antriebstechnologien bereits abdecken und wo Lücken bestehen. Abschnitt 5.4 schließt mit einer Synergieanalyse, in der Barrieren und Potenziale der parallelen

Aneignung von Kompetenzen für mehrere Antriebsstränge bewertet sowie die Implikationen einer Diversifikation gegenüber einer technologischen Fokussierung für unterschiedliche industrielle Stakeholdergruppen diskutiert werden.

5.1 Strukturanalyse der Fahrzeugkonzepte

Wie bereits in Kapitel 4.1 vorgestellt, werden im Rahmen der Wertschöpfungsanalyse vier Antriebstechnologien untersucht und mit dem Dieselantrieb verglichen. Um im Folgenden die Veränderung der wertschöpfenden Methoden und die Unterschiede zum Diesel nachzuvollziehen, werden in diesem Abschnitt die Bestandteile der Antriebsstränge untersucht. Dazu wird in einem ersten Schritt am Beispiel des Diesel-Lkw das Fahrzeug in seine Baugruppen unterteilt. Diese sind das Fahrwerk, der Leiterraum mit Aufbau oder Sattelplatte, die Kabine sowie die Antriebseinheit aus Motor und Getriebe und die Antriebsperipherie aus Tanksystem, Kühlung und Abgasnachbehandlung. Insbesondere das Fahrwerk, der Leiterraum und die Kabine sind essenziell zur Durchführung der Lieferaufgabe des Lkw und somit unabhängig vom Antriebsstrang. In der Abbildung 13 sind sie hervorgehoben.



Quelle: Ford Trucks

Abbildung 13: Chassis eines Lkw, unabhängig vom Antriebsstrang

Um diese „RumpfkompONENTEN“ herum werden die Antriebsstrangkomponenten der in Kapitel 9.1 eingeführten Antriebskonzepte integriert.

Um ein besseres Verständnis der Komponenten der Antriebsstränge und der damit verbundenen Kosten zu erlangen, werden im Folgenden die Herstellungskosten der alternativen Antriebsstränge aufgeschlüsselt. Dazu werden die Kostenanteile der Systemebenen anteilig auf die Gesamtkosten des Fahrzeugs betrachtet. Für den Dieselantriebsstrang ergibt sich damit eine Aufteilung wie in Abbildung 14 dargestellt.

Bezogen auf einen Fahrzeugwert von ungefähr 125.000 € entstehen 37% der Kosten durch die Motorgetriebeeinheit, 15% durch die Komponenten der Abgasnachbehandlung, 23% durch die Ausstattung der Kabine, 11% durch das Fahrwerk

und 14% der Kosten verteilen sich auf diverse andere Faktoren. Damit betragen die Kosten der Antriebsstrangkomponenten 52% der Gesamtfahrzeugkosten, die anderen 48% betreffen die RumpfkompONENTEN des Lkw.

Bei einem BET mit einem Herstellungswert von circa 250.000 € liegen die Herstellungskosten schwerpunktmäßig bei der Batterie. Wie die Abbildung 15 zeigt, entfallen anteilig 64% der Herstellungskosten auf die Batterie, 6% auf den E-Motor und das Getriebe, 12% auf die Ausstattung der Kabine, 6% auf das Fahrwerk und 12% auf weitere Systeme. Anteilig machen die Antriebsstrangkomponenten beim BET also 70% der Gesamtfahrzeugkosten aus. Absolut verändern sich die Kosten der RumpfkompONENTEN nicht.

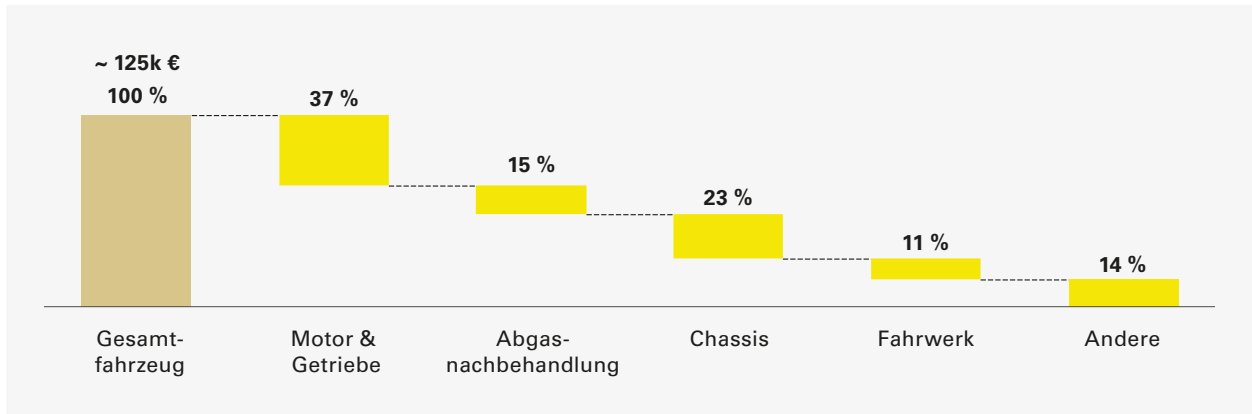


Abbildung 14: Anteilige Herstellungskosten der Komponenten eines Diesel-Lkw

Quelle: Fries et. al. 2017

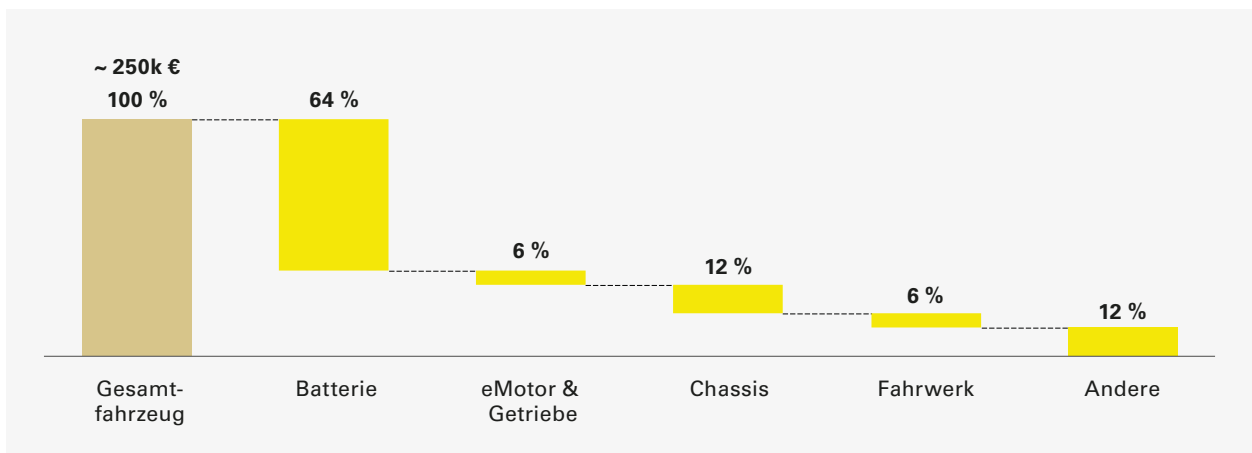


Abbildung 15: Anteilige Herstellungskosten der Komponenten eines BET

Quelle: Neuhausen et. al. 2024

Bei einem FCET mit Herstellungskosten von ungefähr 450.000 € im Jahr 2025 verteilen sich die anteiligen Systemkosten wie folgt: Der Brennstoffzellenstack macht 40% der relativen Kosten aus, die Brennstoffzellenperipherie verantwortet 19% der Kosten, die Kosten für den Wasserstoffspeicher liegen anteilig bei 10%, dazu kommen noch 8% für die Batterie, 6% für die Ausstattung der Kabine, 6% für das Fahrwerk, diese Kostenposition beinhaltet auch den E-Motor und das Getriebe (3%), und 11% für weitere Teilsysteme. Zum Beispiel sind für die Brennstoffzellen große Kühler notwendig. Wie in der Abbildung 16 ersichtlich ist, entstammen 80% der Fahrzeugkosten den Komponenten des Antriebsstrangs, wobei 69% davon dem Wasserstoffsystem zuzuordnen sind.

Wie bereits in Kapitel 5.2 eingeführt, greift der H2-ICET auf Teile des Verbrennungsmotors des Diesels zurück. Darüber

hinaus bedient er sich des Wasserstoffsystems, wie es auch im FCET verbaut ist. Bei einem Fahrzeug mit Herstellungskosten von ungefähr 195.000 € entfallen 25% der Kosten auf Motor und Getriebe, 29% auf das Wasserstoffsystem, 15% auf die Peripherie zum Betrieb des Motors mit Wasserstoff, 15% auf die Ausstattung der Kabine, 7% auf das Fahrwerk und 9% auf weitere Systemkomponenten. Die Abbildung 17 fasst diesen Zusammenhang zusammen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Fahrzeuge auf einen gemeinsamen Pool an Komponenten zugreifen. Das Fahrwerk, inklusive Leiterrahmen, sowie die Kabine nutzen alle Antriebskonzepte. Der Verbrennungsmotor wird sowohl im Diesel als auch im Wasserstoffverbrenner genutzt, wobei sich die Peripherie der Antriebsstränge unterscheidet. Die Elektromotoren und Getriebe, die in BET und FCET integriert werden, sind aufgrund

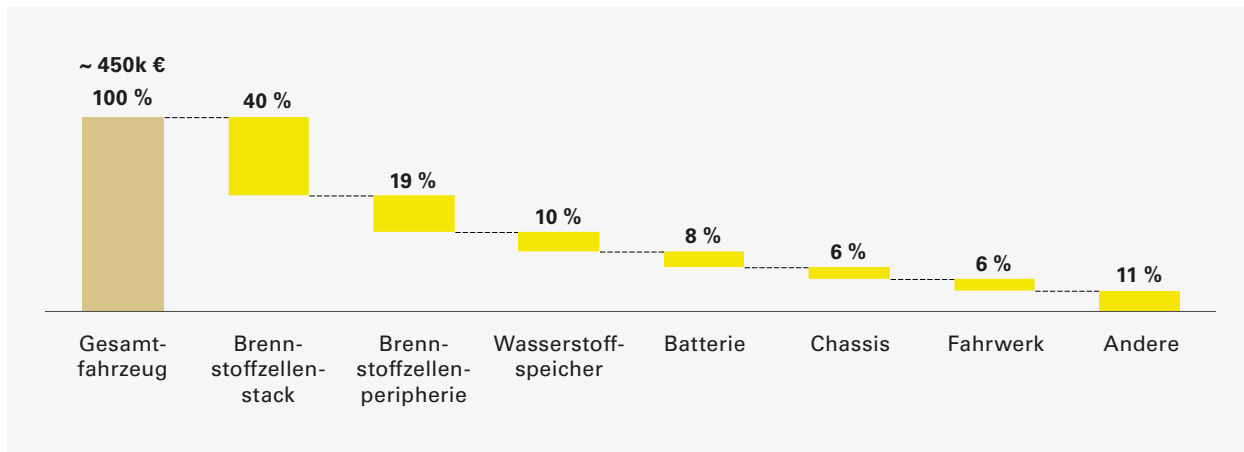


Abbildung 16: Anteilige Herstellungskosten der Komponenten eines FCET

Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

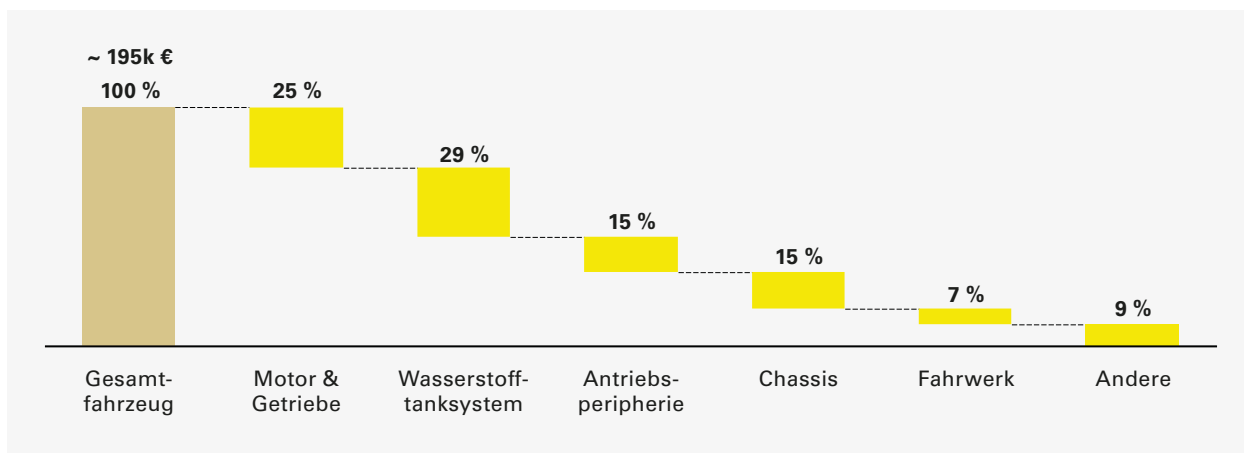


Abbildung 17: Anteilige Herstellungskosten der Komponenten eines H2-ICET

Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

derselben Leistungsklasse identisch. Die Batterien in FCET sind kleiner als jene in BET und besitzen einen Fokus auf eine hohe Leistungsbereitstellung, während BET-Batterien ein hohes Kosten-Energiespeicher-Verhältnis besitzen. Die Brennstoffzellen und die entsprechende Peripherie werden nur in FCET benötigt, wohingegen die Tanksysteme identisch auch in H2-ICET verwendet werden können. Im folgenden Kapitel werden die Systeme, ihre Subsysteme und die Komponenten hinsichtlich der Wertschöpfung und der dafür notwendigen Komponenten untersucht.

5.2 Kompetenzbedarfe zur Fertigung der Antriebsstränge

Wie im Kapitel 4.2 beleuchtet, ist, unabhängig von den betrachteten Szenarien, ein starkes Wachstum der Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben bis zum Jahr 2035 zu erwarten. Daher ist es von elementarer Bedeutung, die Wertschöpfung in alternativen Antrieben sowie die dafür notwendigen Kompetenzen zu analysieren und zu verstehen. Um dies zu ermöglichen, werden in diesem Kapitel die identifizierten Systeme alternativer Antriebsstränge eingehend beleuchtet. Dazu werden diese in ihre Teilsysteme aufgeteilt und deren anteilige Kosten am Gesamtsystem bewertet. Anschließend werden die Kompetenzen zur Herstellung der Teilsysteme abgeleitet und der Wertschöpfungshub durch die Fertigungskompetenzen bestimmt. Damit können der Fertigung der Antriebsstrangtechnologien neben deren Kosten am Gesamtsystem auch ein Bedarf an Kompetenzen zur Herstellung zugeordnet werden, das anschließend in einer Gap-Analyse mit bestehenden Kompetenzen in Baden-Württemberg verglichen wird.

5.2.1 Verbrennungsmotorischer Antriebsstrang

Schwere Nutzfahrzeuge der Emissionsstufe Euro VI werden heute überwiegend von aufgeladenen Dieselmotoren mit Hubräumen von etwa 10 bis 15 Litern und Nennleistungen im Bereich von rund 260 bis 400 Kilowatt angetrieben. Der Motor arbeitet nach dem Diesel-Kreisprozess im klassischen Viertaktverfahren. Die selbstzündende Verbrennung von Diesel und Luft treibt die Kolben an. Über Pleuel und Kurbelwelle wird die translatorische Bewegung in eine Drehbewegung am Motorabtrieb umgewandelt. Die Verbrennungsgase werden über das Auslassventil ausgestoßen. Zur Einhaltung der Grenzwerte der Abgasnorm Euro VI ist eine aufwendige Abgasnachbehandlung erforderlich.

Für die Betrachtung der Wertschöpfung wird der Verbrennungsmotor zunächst in Subsysteme gegliedert. Abbildung 18 zeigt die Verteilung der Kosten eines typischen schweren Dieselmotors auf die wesentlichen Subsysteme. Die Strukturbauteile, im wesentlichen Zylinderblock, Zylinderkopf, Ölwanne und Gehäusekomponenten, stellen mit rund 40 % den größten Kostenblock dar. Der Kurbeltrieb mit Kurbelwelle, Pleueln, Kolben und Lagerungen trägt etwa 20 Prozent zu den Motorkosten bei. Ventiltrieb und Steuerung, bestehend aus Nockenwelle, Ventilen, Ventiltriebskomponenten und Steuerketten oder -rädern, machen rund 10 Prozent aus. Aufladung und Luftpfad, das heißt Turbolader, Ladeluftkühler und Ansaugsystem, verursachen etwa 15 Prozent der Kosten. Die verbleibenden rund 15 Prozent entfallen auf sonstige Komponenten, beispielsweise Sensorik, Aktorik, Dichtungen oder Hilfsaggregate.

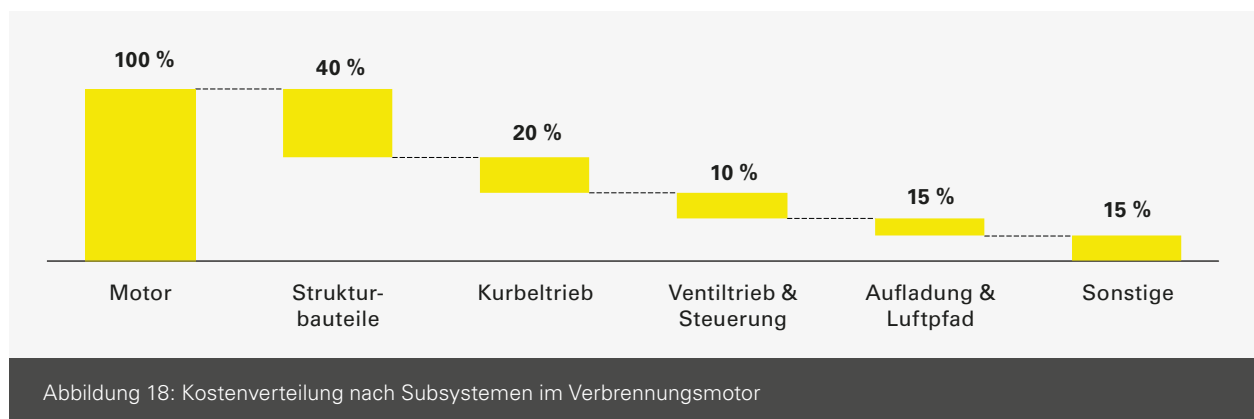
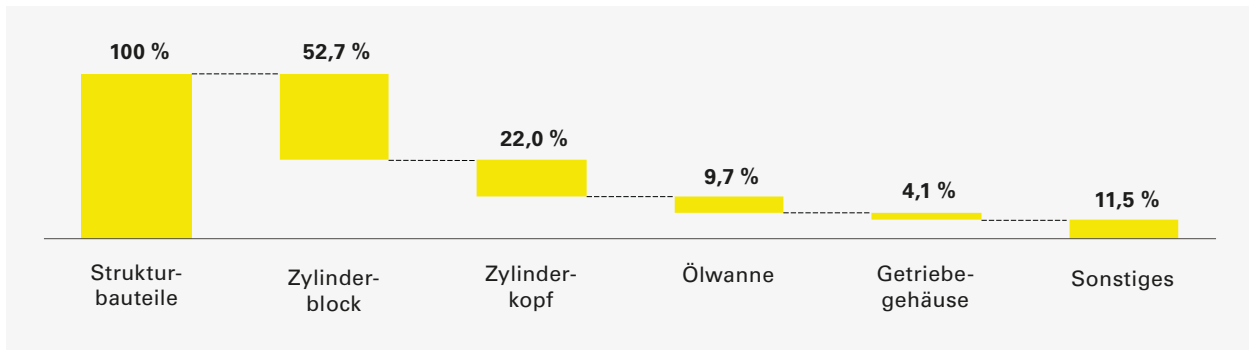


Abbildung 18: Kostenverteilung nach Subsystemen im Verbrennungsmotor



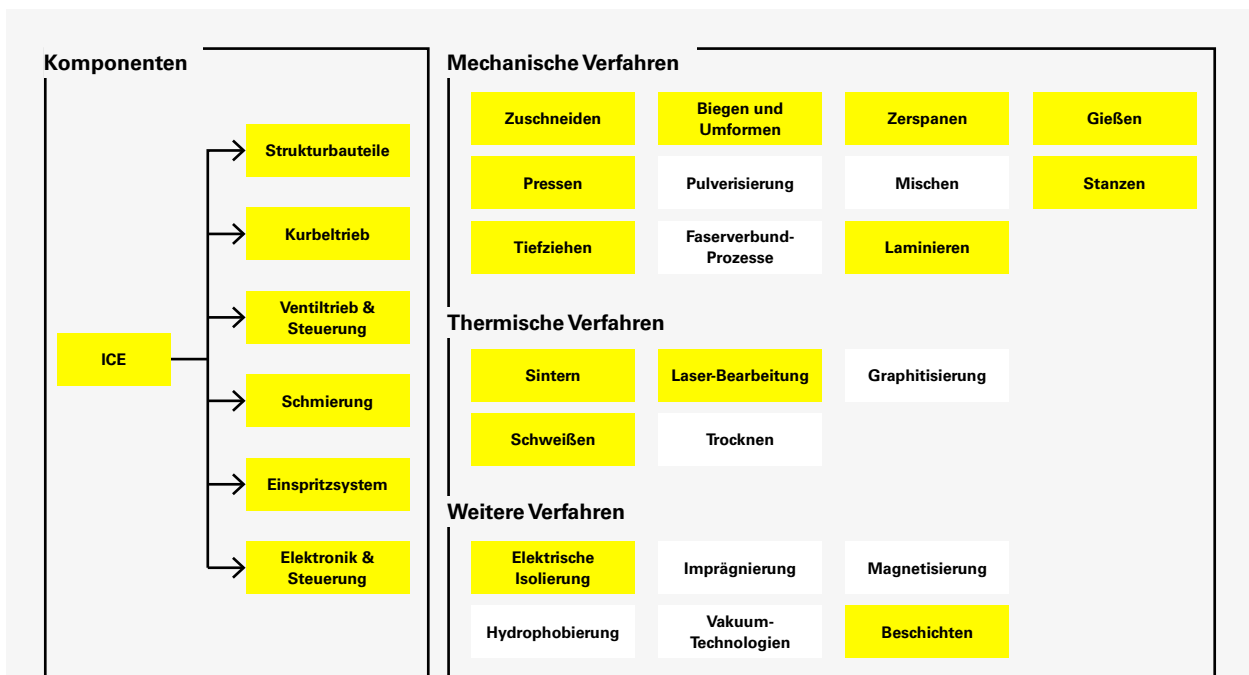
Quelle: Carla Estorilo, Marcelo César Simião, 2006

Abbildung 19: Kosten der Komponenten der Strukturbauteile im Verbrennungsmotor

Eine weitere Detaillierung der Strukturbauteile ist in Abbildung 19 dargestellt. Demnach entfallen innerhalb dieser Baugruppe rund 53 Prozent der Kosten auf den Zylinderblock, 22 Prozent auf den Zylinderkopf und etwa 10 Prozent auf die Ölwanne. Das Getriebegehäuse schlägt mit etwa 4 Prozent zu Buche, während der Rest auf sonstige Gehäusekomponenten, Deckel und kleinere Strukturteile verteilt ist. Die hohen Kostenanteile von Zylinderblock und -kopf spiegeln die hohe Komplexität dieser Gussteile, die aufwendigen Werkzeuge sowie die zahlreichen nachgelagerten Bearbeitungsschritte wider.

Aus der beschriebenen Systemstruktur lassen sich die für die Fertigung notwendigen Kompetenzen ableiten. In Abbildung 20 werden den Komponenten des Motorgrundaggregats, Motorblock, Kolben, Pleuel, Kurbelwelle, Dichtungen, Ventile,

Einspritzdüse, Nockenwelle und Zündkerze bei Ottomotoren die relevanten Fertigungsverfahren zugeordnet. Auf der Ebene der mechanischen Verfahren sind insbesondere Gießereikompetenzen für die Herstellung von Zylinderblock, Zylinderkopf und Gehäusen erforderlich. Daran schließen sich umfangreiche Zerspanprozesse an, etwa Drehen, Bohren, Fräsen und Honen, um Funktionsflächen wie Lagergassen, Zylinderlaufbahnen oder Ventilsitze mit hoher Maß- und Formgenauigkeit herzustellen. Für Bauteile wie Kolben, Pleuel und Kurbelwelle sind darüber hinaus Umform- und Schmiedekompetenzen notwendig, einschließlich der Beherrschung von Werkzeug- und Prozessauslegung. Ergänzend kommen Biege- und Umformprozesse, Stanzen sowie Tiefziehen für Blech- und Biegekomponenten zum Einsatz.



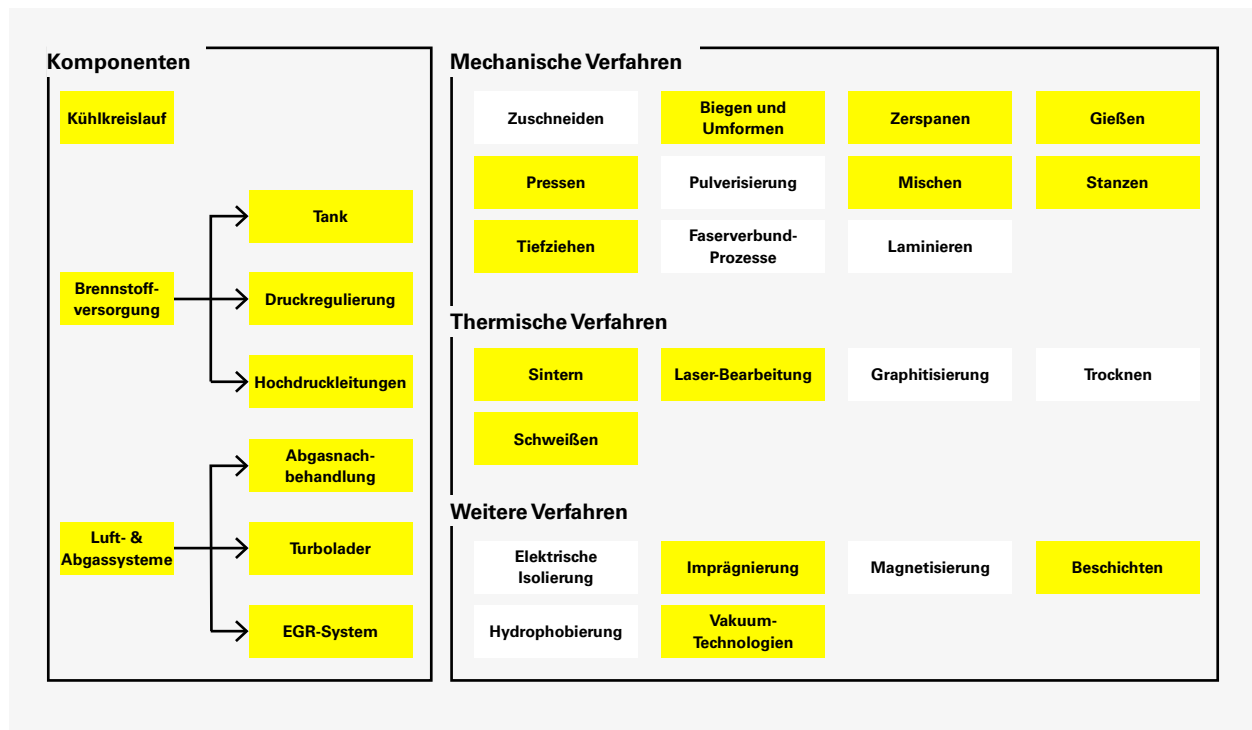
Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026)

Abbildung 20: Notwendige Kompetenzen zur Fertigung von Verbrennungsmotoren

Im Bereich der thermischen Verfahren sind Kenntnisse der Wärmebehandlung zentral, zum Beispiel beim Härten und Anlassen von Kurbelwellen, Nockenwellen oder Zahnrädern. Sintern spielt eine Rolle bei pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen, etwa Zahnrädern oder Lagerbuchsen. Laserbearbeitung wird sowohl für Schneid- als auch für Härteprozesse genutzt und erfordert die Beherrschung prozesssicherer Laseranlagen. Schweißverfahren kommen unter anderem bei der Verbindung von Abgaskomponenten und Halterungen zum Einsatz. Weitere Fertigungsverfahren betreffen Oberflächen- und Funktionsbeschichtungen sowie spezielle Behandlungsschritte. Dazu zählen Beschichtungstechnologien zur Erhöhung der Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit.

Die peripheren Systeme des Verbrennungsmotors, Brennstoffversorgung und Abgasnachbehandlung, verlangen teilweise andere, ergänzende Kompetenzprofile (Abbildung 21). Zum Brennstoffsystem gehören insbesondere Tank, Druckregler, Leitungen und die Hochdruckförderung. Hier stehen Biege- und Umformtechnologien für Rohrleitungen, das Tiefziehen und Fügen von Tankkomponenten sowie die Dichtheits- und Medienbeständigkeit von Verbindungen im Vordergrund. Zerspan- und Gießprozesse werden für Gehäuseteile von Pumpen

und Ventilen benötigt. Die Abgasnachbehandlung umfasst Komponenten wie Dieselpartikelfilter, Katalysatoren, Gehäuse und Turbolader. Neben klassischen Gieß- und Zerspanprozessen für Turbinen- und Verdichtergehäuse sind hier insbesondere keramische Fertigungsverfahren und Beschichtungstechnologien entscheidend, etwa für Wabenkörper und katalytische Schichten. Schweißprozesse werden für das Fügen von Gehäusen und Rohrleitungen eingesetzt, während Imprägnierungs- und Beschichtungsverfahren zur Funktionsoptimierung der filter- und katalysatoraktiven Materialien beitragen. Über alle peripheren Systeme hinweg nimmt die Bedeutung mechatronischer Kompetenzen zu, da Sensoren, Stellglieder und elektronische Steuergeräte eng in das Brennstoff- und Abgasmanagement integriert sind. Elektronikfertigung, Leiterplattenbestückung und Softwareintegration stellen dabei ergänzende Wertschöpfungsfelder dar, die über die klassische Metallverarbeitung hinausgehen.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 21: Notwendige Kompetenzen zur Fertigung der Peripherie von Verbrennungsmotoren

Neben der komponentenbasierten Sicht kann die Wertschöpfung auch nach den identifizierten Fertigungsverfahren betrachtet werden. Abbildung 22 zeigt, dass Zerspanung mit einem Anteil von rund 29 Prozent und Gießen mit etwa 24 Prozent die dominierenden Kostentreiber in der Motorfertigung sind. Weitere bedeutende Anteile entfallen auf Schmieden (11 Prozent), Wärmebehandlung (9 Prozent) und feinmechanische Bearbeitung (7 Prozent). Keramikprozesse, etwa für Einsätze oder Beschichtungen und Montage liegen bei jeweils etwa 6 Prozent, während Lötprozesse (Brazing), Schweißen und Elektronikfertigung mit zusammen rund 8 Prozent zu Buche schlagen. Die Prozesskostenstruktur verdeutlicht, dass die Wertschöpfung im Verbrennungsmotor stark in material- und energieintensiven Grundprozessen der Metallverarbeitung konzentriert ist.

5.2.2 Traktionsbatterie

Die Traktionsbatterie nimmt eine systemkritische Schlüsselposition im Prozess der Elektrifizierung des Nutzfahrzeugsektors ein. Die Produktstruktur der Fahrzeugbatterie lässt sich in drei hierarchische Betrachtungsebenen gliedern: Zellebene, Modulebene und Packebene. Diese Konfiguration wird in der Fachliteratur als klassische Zell-Modul-Pack-Architektur (CMP) bezeichnet. Auf der Zellebene befinden sich die elektrochemischen Speichereinheiten: Batteriezellen.

Mehrere Zellen werden zu einem Modul zusammengefasst, das neben der elektrischen Verschaltung auch mechanische Stabilität gewährleistet. Die Module wiederum werden zu einem Batteriepack integriert, das sämtliche für den Fahrzeugeinsatz erforderlichen Komponenten umfasst, darunter thermisches Management, Gehäusestrukturen sowie elektrische Schnittstellen.¹

Die CMP-Architektur bildet die Grundlage für die Darstellung der jeweiligen Komponenten und der zugehörigen Fertigungsprozesse in diesem Abschnitt. Neben dieser etablierten Struktur existiert die sogenannte Cell-to-Pack-Architektur (CTP), bei der die Batteriezellen direkt in das Batteriepack integriert werden, wodurch die Zwischenstufe der Modulbildung entfällt. Diese Bauweise reduziert den Anteil an inaktiven Materialien und peripheren Elementen, wodurch wiederum Gewicht und Größe des Packs verringert werden. Die optimierte Raumnutzung ermöglicht eine Steigerung der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte, die sich unmittelbar auf Reichweite und Effizienz batterieelektrischer Fahrzeuge auswirkt.²

1 | Kampker & Heimes 2024
 2 | Kampker & Heimes 2024

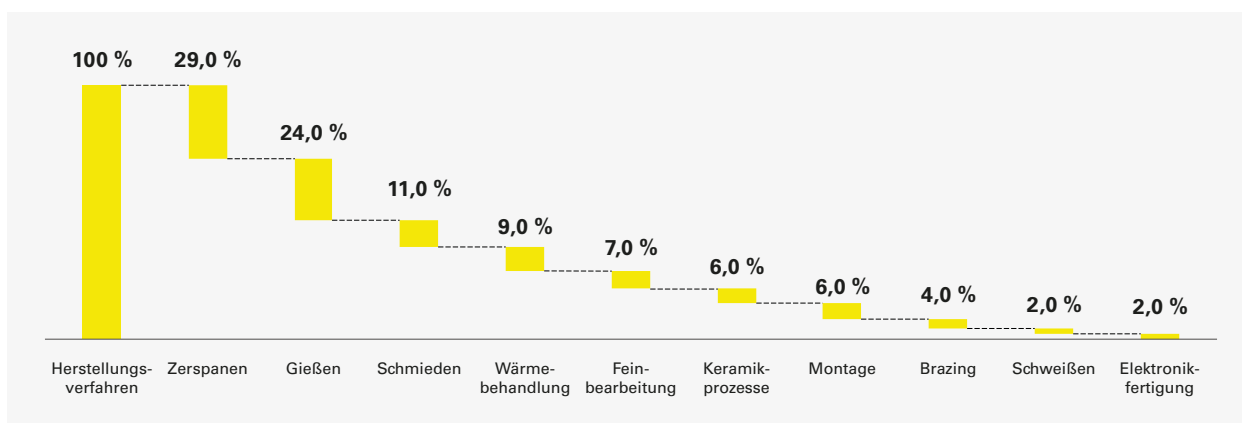
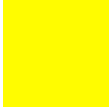


Abbildung 22: Wertschöpfung nach Fertigungsverfahren im Verbrennungsmotor

Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026



Unabhängig von der Zellchemie und der Zellformate lässt sich die relative Kostenverteilung auf der Zell- sowie Modul- und Packebene ähnlich abbilden. Eine nach der CMP-Architektur aufgeschlüsselte Kostenverteilung je Strukturebene ist in Abbildung 23 dargestellt. Der deutlich höhere Beitrag zur Gesamtkostenstruktur liegt auf der Zellebene der Traktionsbatterie und lässt sich durch die damit verbundenen Material- und

Fertigungsaufwände erklären. Die komponentenweise erforderlichen Materialaufwände auf der Zellebene sind an dem repräsentativen Beispiel einer NMC-basierten Lithium-Ionen-Batterie in Abbildung 24 dargestellt. Das zur einleitenden Kostenübersicht verwendete Beispielszenario¹ ist in diesem Abschnitt unter Wertschöpfung näher beschrieben.

1 | Knehr et al. 2024.

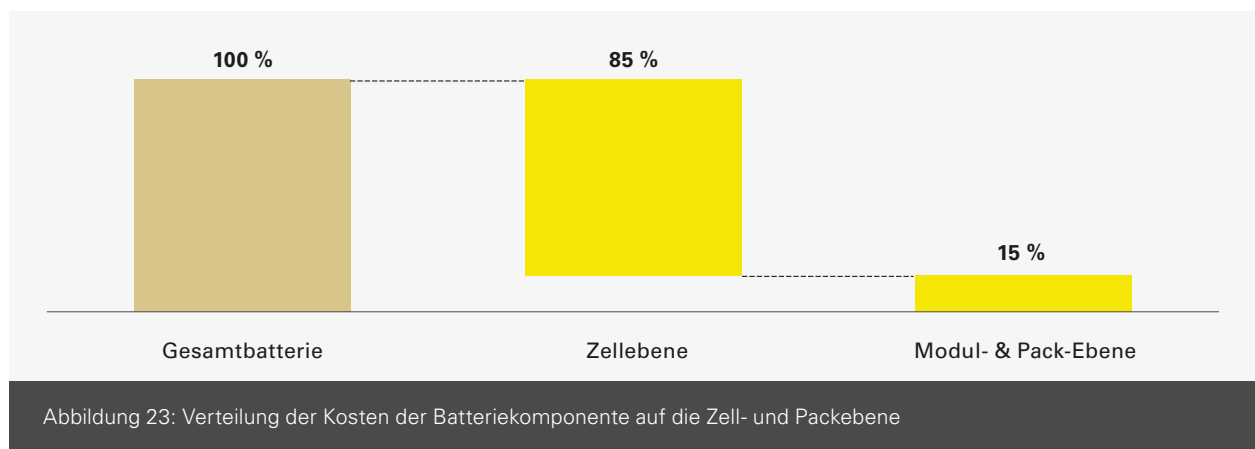


Abbildung 23: Verteilung der Kosten der Batteriekomponente auf die Zell- und Packebene

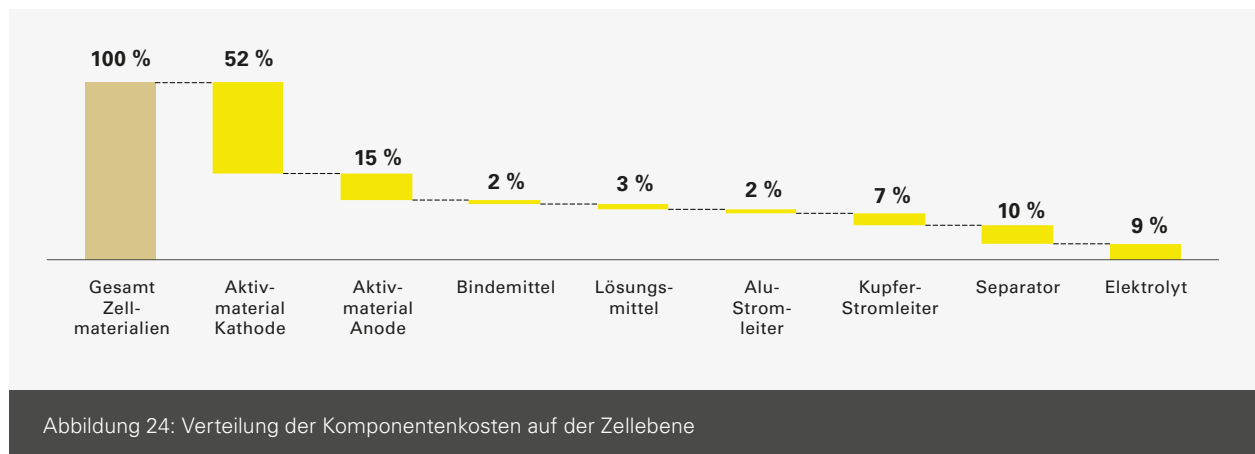


Abbildung 24: Verteilung der Komponentenkosten auf der Zellebene

Zur Betrachtung aller Strukturebenen und ihres Einflusses auf die Wertschöpfung werden die erforderlichen Fertigungs-kompetenzen in den nachfolgenden Abbildungen gemäß der CMP-Architektur systematisch dargestellt. Die Komponenten und Fertigungsverfahren auf der Zellebene sind in Abbildung 25, auf der Modulebene in Abbildung 26 und auf der Packebene in Abbildung 27 dargestellt.

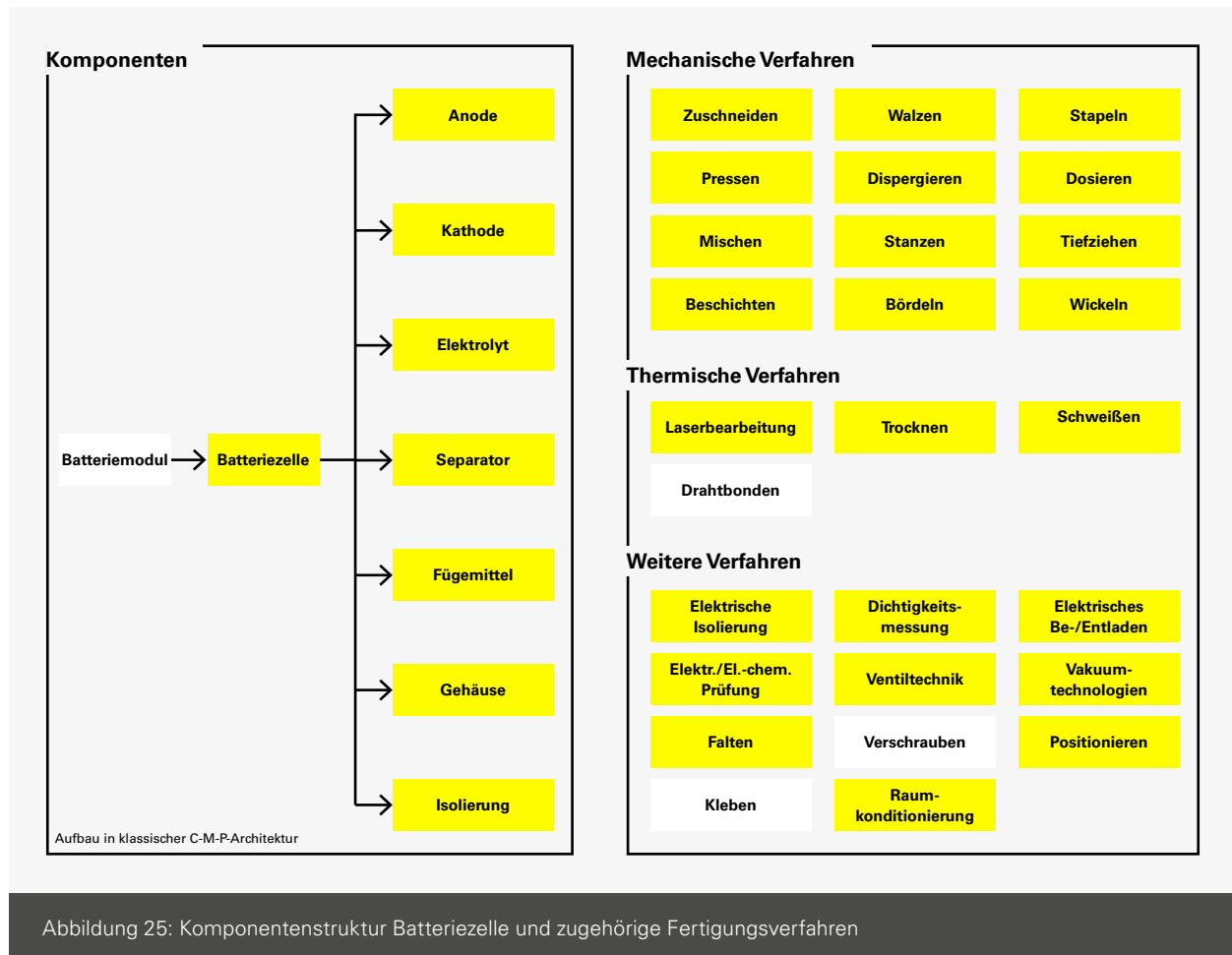


Abbildung 25: Komponentenstruktur Batteriezelle und zugehörige Fertigungsverfahren

Die Batteriezellherstellung erfolgt in einem mehrstufigen Prozess und ist in drei Abschnitte unterteilt: Elektrodenfertigung, Zellausbaufertigung und Zellfinalisierung. Zunächst werden im Schritt Dosieren und Mischen der Elektrodenfertigung Aktivmaterialien und Additive mit Lösungsmittel zu einem homogenen „Slurry“ verarbeitet. Im Schritt Beschichten wird dieser Slurry mittels Auftragswerkzeug kontinuierlich auf eine Trägerfolie aufgebracht. Im anschließenden Trocknungsschritt wird das Lösungsmittel entzogen. Beim Kalandern wird die Elektrodenfolie durch ein Walzenpaar verdichtet. Beim anschließenden Slitting wird das Elektrodenband in kleinere

Elektrodenbänder (Tochtercoils) geschnitten. Diese durchlaufen das Vakuumtrocknen in einem Ofen, um Restfeuchte zu entfernen. Die Weiterverarbeitung in der Zellausbaufertigung hängt vom Zelltyp ab: Vereinzeln und Stapeln für Pouch- und prismatische Zellen oder Wickeln für Rundzellen, um die Elektroden-Separator-Einheit zu bilden. Anschließend erfolgt das Verpacken im jeweiligen Gehäuse, wobei die Ableiter kontaktiert und verschweißt werden. Abschließende Zellaktivierung und Qualitätskontrolle sind der Zellfinalisierung zuzuordnen. Hierbei kann die Elektrolytbefüllung der Zellausbaufertigung oder der Zellfinalisierung zugeordnet werden.¹

1 | Plumeyer et al. 2023; Kokozinski et al. 2024.

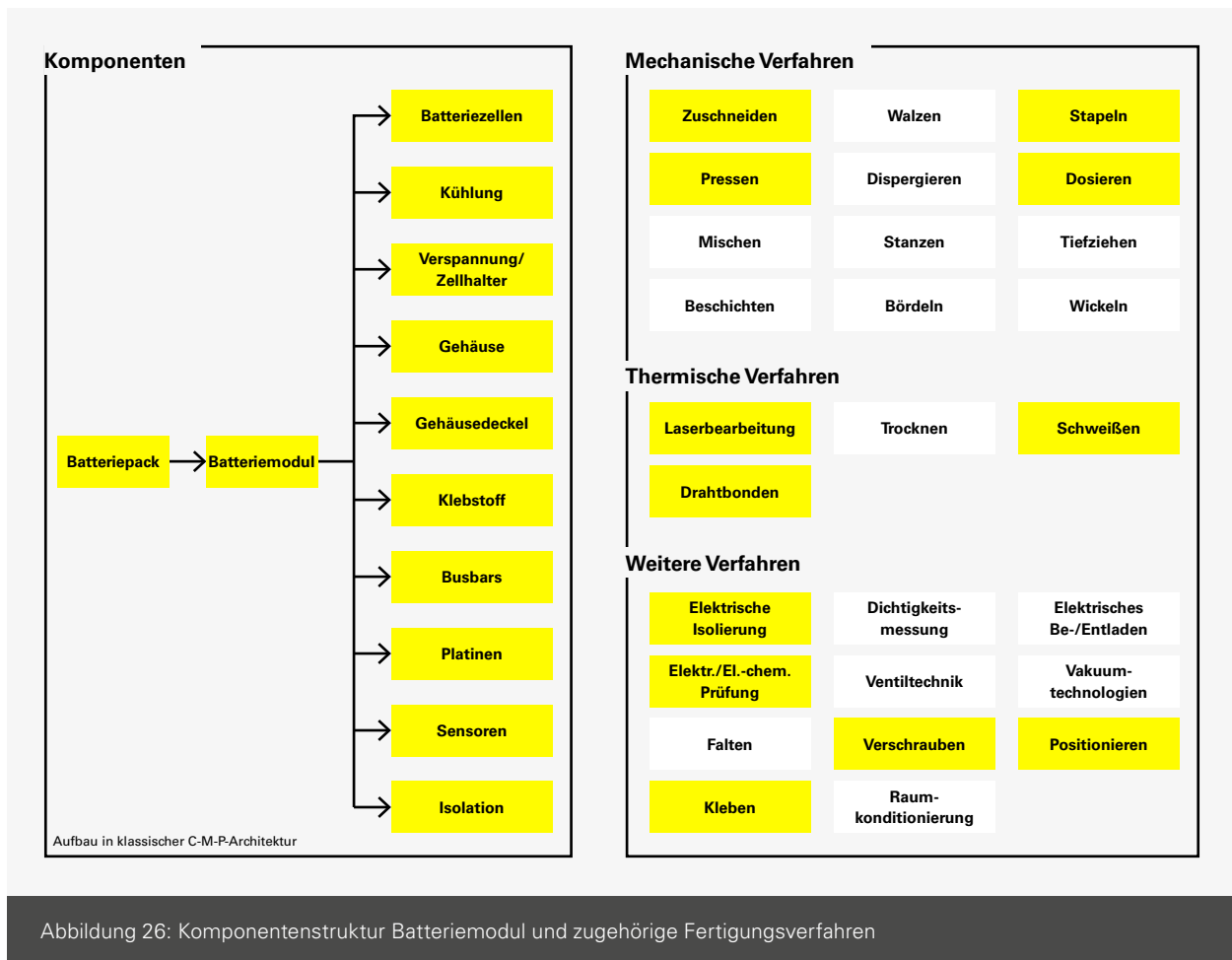


Abbildung 26: Komponentenstruktur Batteriemodul und zugehörige Fertigungsverfahren

Dieser Schritt erfolgt über eine Dosierlanze, wobei der Elektrolyt durch Druck optimal verteilt wird. Eine optionale Vorbehandlung kann die Benetzung im Zellinneren weiter verbessern. Die Formierung ist ein entscheidender Schritt, bei dem die ersten Lade- und Entladevorgänge stattfinden, um die leistungsbestimmenden Grenzschichten im Zellinneren zu bilden. Die im Ladevorgang entstehende Gase werden beim Entgasen entfernt und die Zelle final verschlossen. Die Reifung der Zelle dient der Qualitätssicherung, indem die Zellen gelagert und überwacht werden. Den Abschluss bildet das EoL-Testing (End-of-Line), bei dem die Zellen umfassenden Prüfungen unterzogen, auf einen bestimmten-Ladezustand zum weiteren Transportieren – zur Modul- und Packfertigung – entladen, sortiert („Grading“) und schließlich verpackt werden.¹

In der Batteriemodul- und Packfertigung werden, gemäß der CMP-Architektur, einzelne Batteriezellen zu Modulen und diese anschließend zu einem kompletten Batteriepack integriert. Ein Modul besteht neben den Batteriezellen aus wesentlichen funktionalen Komponenten: Zellhalterungen oder Verspannungen, Gehäuse, Kühlelemente, Busbars, Platinen für das Batteriemanagementsystem (BMS), Sensoren, Klebstoffe oder Füllstoffe sowie ein Gehäusedeckel und Isolationselemente. Diese gewährleisten die notwendige mechanische Stabilität, thermische und elektrische Sicherheit sowie die volle Funktionalität des Moduls im Gesamtsystem.

Die Modulmontage beginnt mit der Wareneingangsprüfung und der Sortierung der angelieferten Zellen. Anschließend werden die Zellen mittels isolierender Klebstoffe gefügt,

1 | Heimes et al. 2023 (1).

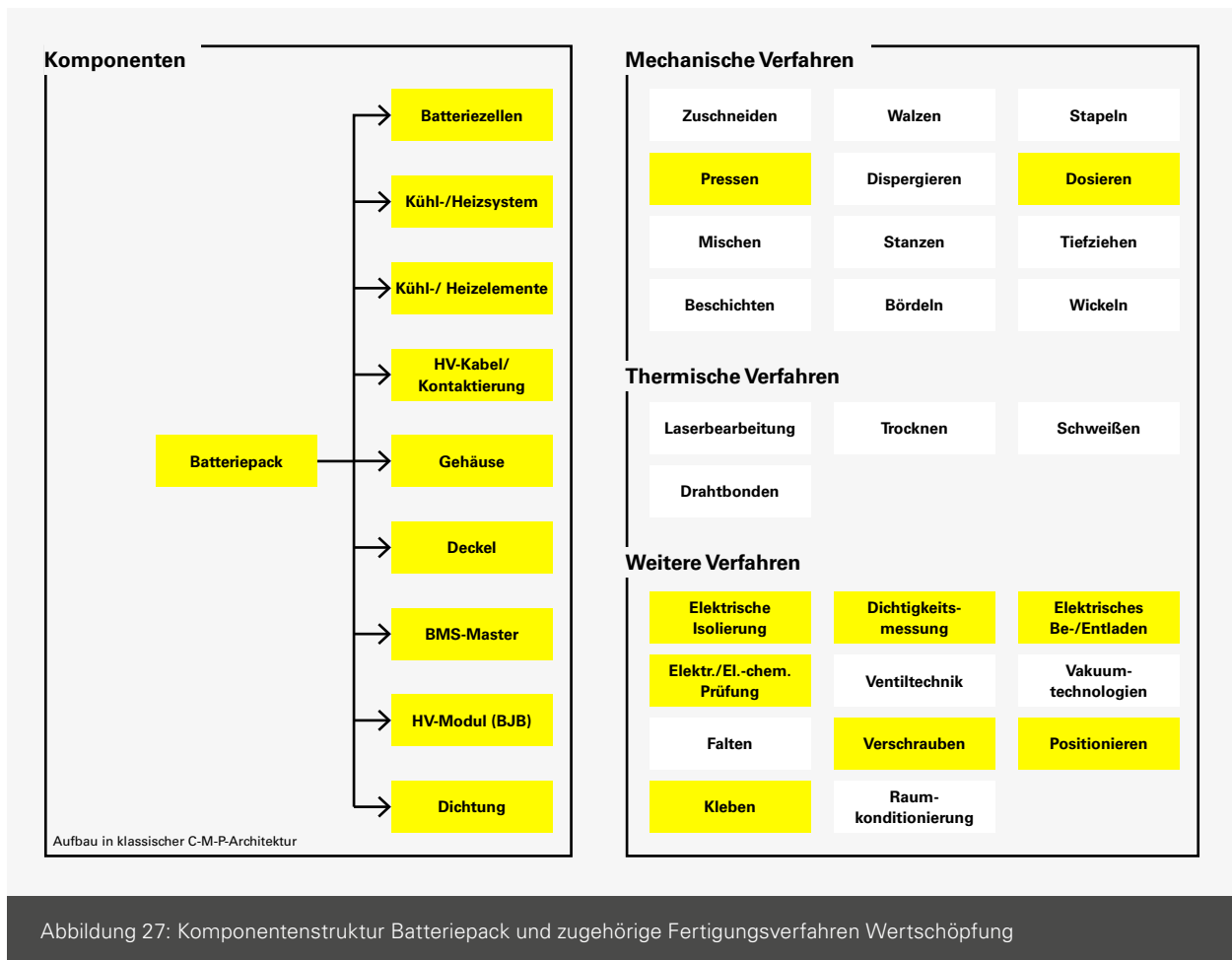


Abbildung 27: Komponentenstruktur Batteriepack und zugehörige Fertigungsverfahren Wertschöpfung

definiert gestapelt und zur Geometrieerhaltung verpresst. Die elektrische Kontaktierung der Zellen erfolgt durch präzise Schweißverfahren wie Laser- oder Ultraschallschweißen. Danach werden BMS und Sensorik montiert, verkabelt und durch Funktionstests auf ihre ordnungsgemäße Arbeitsweise geprüft. Umfangreiche Modultests, einschließlich Dichtheits- und Hochvoltprüfungen, schließen die Modulfertigung ab.¹ Auf Packebene werden mehrere Module integriert und durch zusätzliche Komponenten ergänzt: Kühlplatten, Thermomanagementsysteme, Crashstrukturen, Hochvolt-Stecker, Sicherungselemente sowie der äußere Rahmen und das Gehäuse mit Abdichtung. Die Packintegration umfasst zudem die Fixierung sowie die elektrische und thermische Integration, einschließlich Kühlsystem und BMS-Master. Nach der Mon-

tage des Gehäusedeckels und einem finalen Dichtheitstest wird das BMS mit der spezifischen Software bespielt (geflasht) und die Zellen auf den definierten Ladezustand gebracht. Das abschließende End-of-Line-Testing (EoL) prüft sämtliche Elektronik- und Sicherheitssysteme, bevor das fertige Batteriepack freigegeben und verpackt wird.²

Während die Modul- und Packproduktion primär mechanische und elektrische Integrationsprozesse umfasst, ist die Zellfertigung sehr material- und prozessintensiv und bestimmt die Leistungsfähigkeit der gesamten Batterie. Die Wahl der Materialien und die präzise Fertigung dieser Komponenten sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Lebensdauer der Batterie. Die beschriebenen Prozessketten von

1 | Heimes et al. 2023 (2).
 2 | Heimes et al. 2023 (2).

der Zell- bis zur Packproduktion sind entscheidend für die Qualität und Kostenstruktur der Batterieproduktion. Als größter Anteil der Wertschöpfung wird die Zellherstellung angesehen.¹ Derzeit befindet sich der Markt für Batteriezellen in einer dynamischen Entwicklungsphase. Hinsichtlich der Batteriezelltechnologie ist die Lithium-Ionen-Batterie nach wie vor die am weitesten verbreitete Technologie und verfügt über einen hohen Technology Readiness Level (TRL). Sie wird in nahezu allen Elektrofahrzeugen eingesetzt und gilt als industrieller Standard aufgrund ihrer ausgereiften Fertigungsprozesse und hohen Energiedichte. Neben Lithium-Ionen-Zellen gewinnen alternative Technologien zunehmend an Aufmerksamkeit. Natrium-Ionen-Batterien stellen eine vielversprechende Option dar, insbesondere aufgrund der Verfügbarkeit von Rohstoffen und potenziell geringerer Kosten. Dennoch befinden sie sich noch in einer frühen Phase der Kommerzialisierung und ihre Energiedichte im Vergleich zu Lithium-Ionen bleibt ein limitierender Faktor für den Einsatz in Langstrecken-Elektrofahrzeugen. Ein weiterer Trend sind Festkörperbatterien (Solid-State Batteries), die durch den Einsatz fester Elektrolyte eine höhere Sicherheit und Energiedichte versprechen. Allerdings ist die Variante All-Solid-State derzeit noch nicht ausreichend ausgereift, um aktuell eine industrielle Serienproduktion zu erreichen. Die Herausforderungen liegen vor allem in der Skalierung und den hohen Produktionskosten.²

Zur Wertschöpfungs- und Kostenanalyse muss daher ein Betrachtungsrahmen definiert werden, da insbesondere auf der Zellebene chemisch und auch bezüglich des äußeren Zellsignals schnelle Entwicklungen zu beobachten sind. Es existieren zahlreiche Zelltypen und Zellchemien, die sich in Materialzusammensetzung, Leistungsfähigkeit und Kostenstruktur voneinander unterscheiden. Chemisch betrachtet wird die NMC-Technologie (Nickel-Mangan-Kobalt) vorerst den Markt dominieren. Sie bietet eine hohe Energiedichte und ist für den Einsatz in Elektrofahrzeugen derzeit die bevorzugte Wahl. Dennoch sind äußerliche Anpassungen der Zellformate in den kommenden Jahren nicht exakt prognostizierbar, da die Branche stark von Innovationszyklen und Kostenoptimierungen geprägt ist. Jedoch lassen sich bestimmte Tendenzen beobachten. Unter anderem ist beobachtbar, dass Hersteller zu-

nehmend auf großformatige prismatische oder Pouch-Zellen setzen, um die Anzahl der Einzelzellen im Pack zu reduzieren und Komplexität zu senken (z. B. BYD Blade Battery)³. Diese Entwicklung bringt allerdings neue Herausforderungen mit sich, insbesondere beim Handling während der Zellfertigung. Größere Zellen erfordern angepasste Produktionsprozesse, präzisere Automatisierung und optimierte Qualitätssicherung, um mechanische Stabilität und Sicherheit zu gewährleisten.⁴

Am einem repräsentierbaren Beispielszenario mit 300 NMC 811-Zellen, produziert durch eine 50 GWh-Gigafactory, integriert in einem Pack über 10 Module mit einer Gesamtkapazität von 94 kWh, wird die Kostenbetrachtung durchgeführt.⁵ Die Kostenstruktur auf Zell-, Modul- und Packebene wird in Material- und Herstellkosten unterteilt und sowohl prozentual als auch in kWh angegeben (siehe Abbildung 28, Abbildung 29). Die Kostenanteile in diesem Szenario bewegen sich im Rahmen der Kosteneinschätzungen weiterer Studien.⁶ Daraus können die Einflüsse der jeweiligen Kostenkomponenten auf die Gesamtbatteriekosten abgeleitet werden. In der Kostenstruktur ist ersichtlich, dass die höchsten Kosten durch die Materialien und die Fertigung der Batteriezellen (85%) verursacht werden. Die Kosten auf der Modul- und Packebene sind vergleichsweise gering (15%). Auf der Zellebene sind Materialien der höchste Kostenfaktor und verursachen 65% der Gesamtbatteriekosten im betrachteten Szenario. Die Herstellung der Batteriezellen ist ein weiterer relevanter Faktor für die hohen Kosten auf der Zellebene und liegt bei 21%. Dabei sind Materialkosten stark von den Rohstoffpreisen abhängig, während die Herstellkosten technologisch bedingt sind und tendenziell mit zunehmender Beherrschung und Reife der Fertigungskompetenz reduziert werden.

1 | Wentker et al. 2019; Wunderlich et al. 2024; Bernhart 2022; Heimes & Bernhart 2022; Heimes & Bernhart 2023; Heimes & Bernhart 2024/2025.

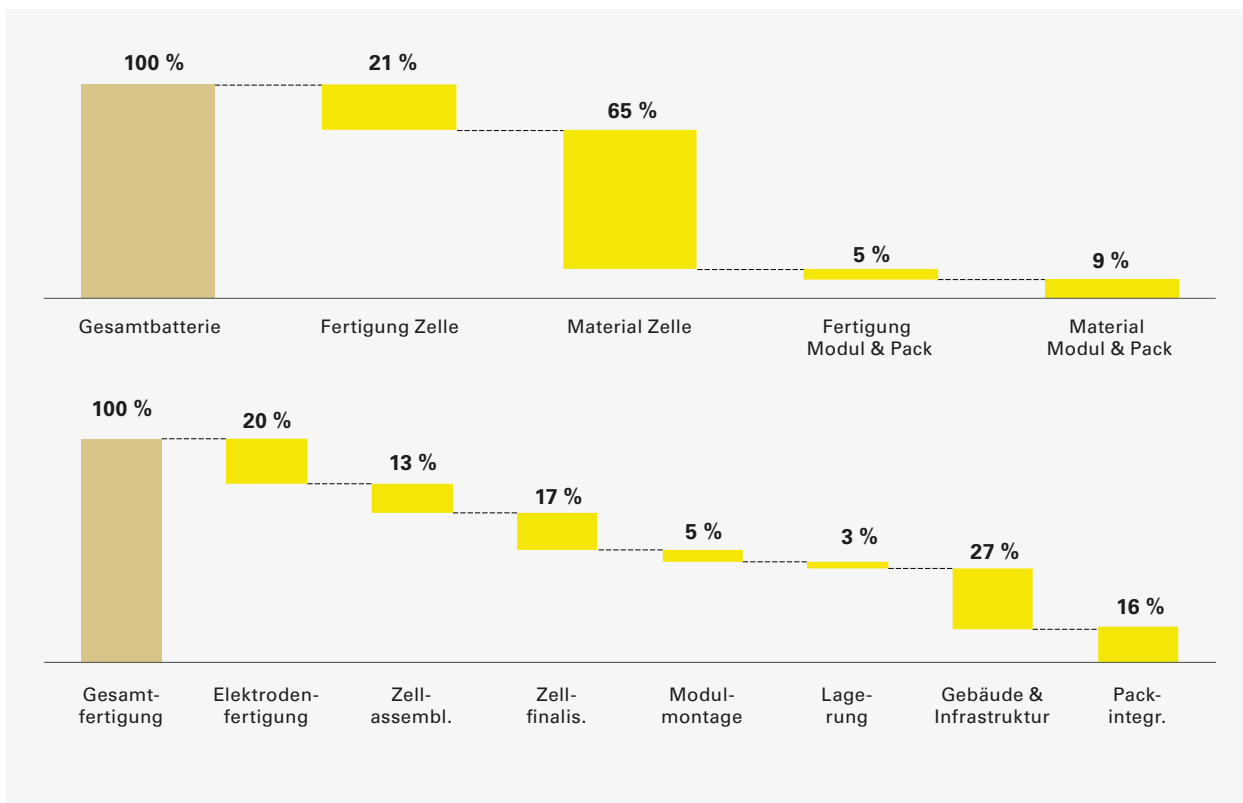
2 | Hettesheimer et al. 2023.

3 | Kampker et al. 2025; Michaelis et al. 2023.

4 | Degen et al. 2023.

5 | Knehr et al. 2024.

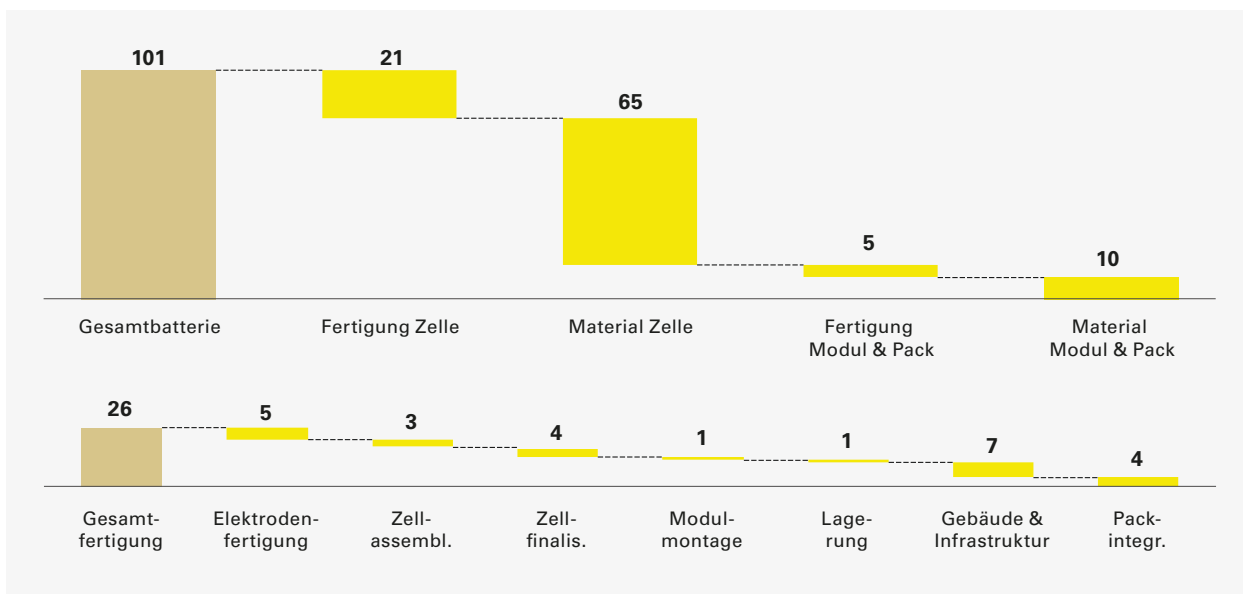
6 | König et al. 2021; McKinsey & Company 2024; Küpper et al. 2025.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 28: Kostenbeitrag der Fertigung in der Gesamtkostenverteilung (prozentual)

Die Analyse der Fertigungskostenstruktur einer Batterie zeigt eine klare Verteilung: Innerhalb der Kostenstruktur der Batterie entfallen 21% der Gesamtherstellkosten auf die Zellebene und 5% auf die Modul- und Packebene. Innerhalb der Herstellung der Batterie verursacht die Summe der Fertigungsschritte in der Elektrodenfertigung (20%) die höchsten Kostenanteile, gefolgt von



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 29: Kostenbeitrag der Fertigung in der Gesamtkostenverteilung (€ pro kWh)

der Zellfinalisierung (17%), der Packintegration (16%) und der Assemblierung (13%). Allerdings ist die Bedeutung der Infrastruktur- und Gebäudekosten zu beachten, die im Beispielszenario 27% betragen. Gründe hierfür sind beispielsweise die strengen Konditionierungen wie notwendige Trocken- und Reinraumbedingungen für die Elektrodenfertigung und Zellassemblierung und Sicherheitsanforderungen nach der Zellaktivierung.¹

Kompetenzen in der Wertschöpfungskette

Aufbauend auf der Komponentenstruktur und den zugehörigen Verfahren lassen sich drei wesentliche Kompetenzbereiche für die Herstellung von Batteriezellen, -modulen und -packs ableiten (siehe Tabelle 3). Zur Fertigung einer Traktionsbatterie ist eine breite Palette an Top-Kompetenzen erforderlich, wobei die Diversität der Fertigungskompetenzen maßgeblich

durch die Batteriezellherstellung getragen wird. Diese umfassen unter anderem die Top-Kompetenzen Mischen, Beschichten, Trocknen, Dosieren, Vakuum-Technologie, Stapeln, Wickeln, Falten und Schweißen. Die Batteriemodul- und -packproduktion hingegen erfordern zum größten Teil Standard-Bearbeitungen wie Positionieren und Verschrauben.

Hinsichtlich der zuvor beschriebenen Entwicklungsdynamiken in der Zellentwicklung und somit veränderbarer Zellfertigung sind weitere Kompetenzen neben den dargelegten Fertigungskompetenzen künftig relevant. Diese umfassen die Automatisierung und Digitalisierung, um Ausschussraten zu senken und die Qualität zu steigern; innovative Verfahren, die den Energieverbrauch und die benötigte Produktionsfläche erheblich reduzieren; Schnittstellenverständnis, um Zellsignänderungen in bestehende Linien zu integrieren.²

1 | Degen et al. 2023.
2 | EDAG 2025.

Komponenten		Top-1-Kompetenz	Top-2-Kompetenz	Top-3-Kompetenz
Batteriezelle	Anode	Mischen	Beschichten	Trocknen
	Kathode	Mischen	Beschichten	Trocknen
	Elektrolyt	Dosieren	Vakuum-Technologien	Raumkonditionierung
	Separator	Stapeln	Wickeln	Falten
	Fügemittel	Schweißen		
	Gehäuse	Laserbearbeitung	Dichtigkeitsmessung	Positionieren
	Isolierung	Elektrische Isolierung	Elektr./El.-chem. Prüfung	
Batteriemodul* <small>* Komponenten neben Batteriezellen</small>	Kühlung	Positionieren	Verschrauben	
	Verspannung/Zellhalter	Positionieren	Verschrauben	
	Gehäuse	Positionieren	Laserbearbeitung	Dichtigkeitsmessung
	Gehäusedeckel	Positionieren	Laserbearbeitung	Schweißen
	Klebstoff	Kleben	Dosieren	
	Busbars	Verschrauben	Schweißen	Positionieren
	Platinen	Drahtbonden	Schweißen	Positionieren
	Sensoren	Schweißen	Drahtbonden	Verschrauben
	Isolation	Elektrische Isolierung	Elektr./El.-chem.Prüfung	
Batteriepack** <small>** Komponenten neben Batteriemodulen</small>	Kühl-/Heizsystem	Verschrauben	Positionieren	Dichtheitsmessung
	HV-Kabel/ Kontaktierung	Elektrisches Be-/Entladen	Verschrauben	
	Gehäuse	Positionieren	Dichtheitsmessung	Verschrauben
	Deckel	Verschrauben	Dichtheitsmessung	
	BMS-Master	Verschrauben	Positionieren	
	HV-Modul	Verschrauben	Positionieren	
	Dichtung	Dosieren	Kleben	Dichtheitsmessung

Tabelle 3: Übersicht der Hauptkompetenzen zur Herstellung der Batteriekomponente

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Zentrale Erkenntnisse der Wertschöpfungsanalyse der Traktionsbatterie

- 85% der Gesamtbatteriekosten entstehen auf Zellebene (65% Material, 21% Fertigung).
- Höchste Fertigungskostenblöcke: Elektrodenfertigung (20%), Zellfinalisierung (17%), Pack-Integration (16%)
- Größter Wertschöpfungshebel liegt im Aufbau von Zellfertigung und vorgelagerter Materialproduktion

5.2.3 E-Motor

In Traktionsanwendungen werden permanent- und fremd-erregte Synchronmaschinen sowie Asynchronmaschinen in Radialfluss-Bauweise eingesetzt.¹ Die drei Topologien unterscheiden sich hauptsächlich, neben der Art der Ansteuerung, über den Aufbau des Rotors. Insgesamt kann der Elektromotor in die Subkomponenten Gehäuse, Stator, Rotor und Kühlsystem unterteilt werden. Die Leistungselektronik zur Ansteuerung sowie das Getriebe zur Wandlung von Drehmoment und Drehzahl sind häufig in das Gehäuse des Elektromotors selbst direkt integriert. Auf den Aufbau und die Wertschöpfung in der Leistungselektronik wird im späteren Verlauf näher eingegangen. In Abbildung 30 wird das System zusammengefasst.

Der Stator, das statische Aktivteil des Elektromotors, erzeugt ein rotierendes, elektromagnetisches Feld. Grundlage für den Stator bildet das Statorblechpaket, das aus Elektroblech, in der Regel einer Eisen-Silizium-Legierung, aufgebaut wird. Der Werkstoff, ein sogenannter weichmagnetischer Werkstoff, ist leicht magnetisierbar, sodass der magnetische Fluss im Elektroblech geführt werden kann.² Zur Reduzierung von Verlusten besteht das Elektroblech aus einzelnen, voneinander isolierten Lamellen, die eine Dicke zwischen 0,2 und 0,5 mm aufweisen.³ In das Statorblechpaket sind Nuten eingestanz, in die eine Wicklung zur Erzeugung des Drehfeldes einge-

bracht wird. Die Nuten selbst werden durch eine Nutgrundisolation isoliert, um die Wicklung vom Erdpotential des Statorblechpakets zu trennen. Die Nutgrundisolation ist in der Regel ein Nutisolationpapier, ein expandierendem Nutisolationpapier oder ein Einsatz aus Kunststoff.

Die Wicklungen werden so angeordnet, dass sie im Statorblechpaket Spulen bilden, die sich jeweils untereinander in ihrer elektrischen Phasenlage unterscheiden. Durch die Phasenlage und das Drehstromsystem, das die einzelnen Spulen speist, kommt ein rotierendes Magnetfeld zustande.⁴ Die Spulen können entweder konzentriert um einzelne sogenannte Statorzähne oder verteilt über mehrere Zähne gewickelt werden. Die Wicklung selbst besteht entweder aus runden oder rechteckigen isolierten Kupferdrähten. Für Traktionsanwendungen werden jedoch hauptsächlich isolierte rechteckige Flachdrähte eingesetzt.⁵ Dadurch können höhere Füllfaktoren und dadurch höhere Leistungsdichten und Wärmeabführungen realisiert werden. Als Leiterwerkstoff wird bisher ausschließlich Kupfer eingesetzt, als Drahtisolationmaterial hauptsächlich Polyamidimid (PAI), Polyetheretherketon (PEEK), Polyimid (PI) und Perfluoralkoxy (PFA)⁶. Die Phasen der Wicklung des Stators werden über eine Anschlussbaugruppe mit der Leistungselektronik verbunden. Abschließend wird eine Sekundärisolation in die Statornut eingebracht, um die Wärmeleitfähigkeit zu verbessern und einen Schutz vor äußeren Einflüssen sicherzustellen.⁷ Der Stator wird entweder in den Kühlmantel oder in das Gehäuse selbst eingepresst.

1 | Drexler et al. 2025.

2 | Kampker und Heimes 2024.

3 | Drexler et al. 2025.

4 | Schröder und Kennel 2021.

5 | Drexler et al. 2025.

6 | Drexler et al. 2025.

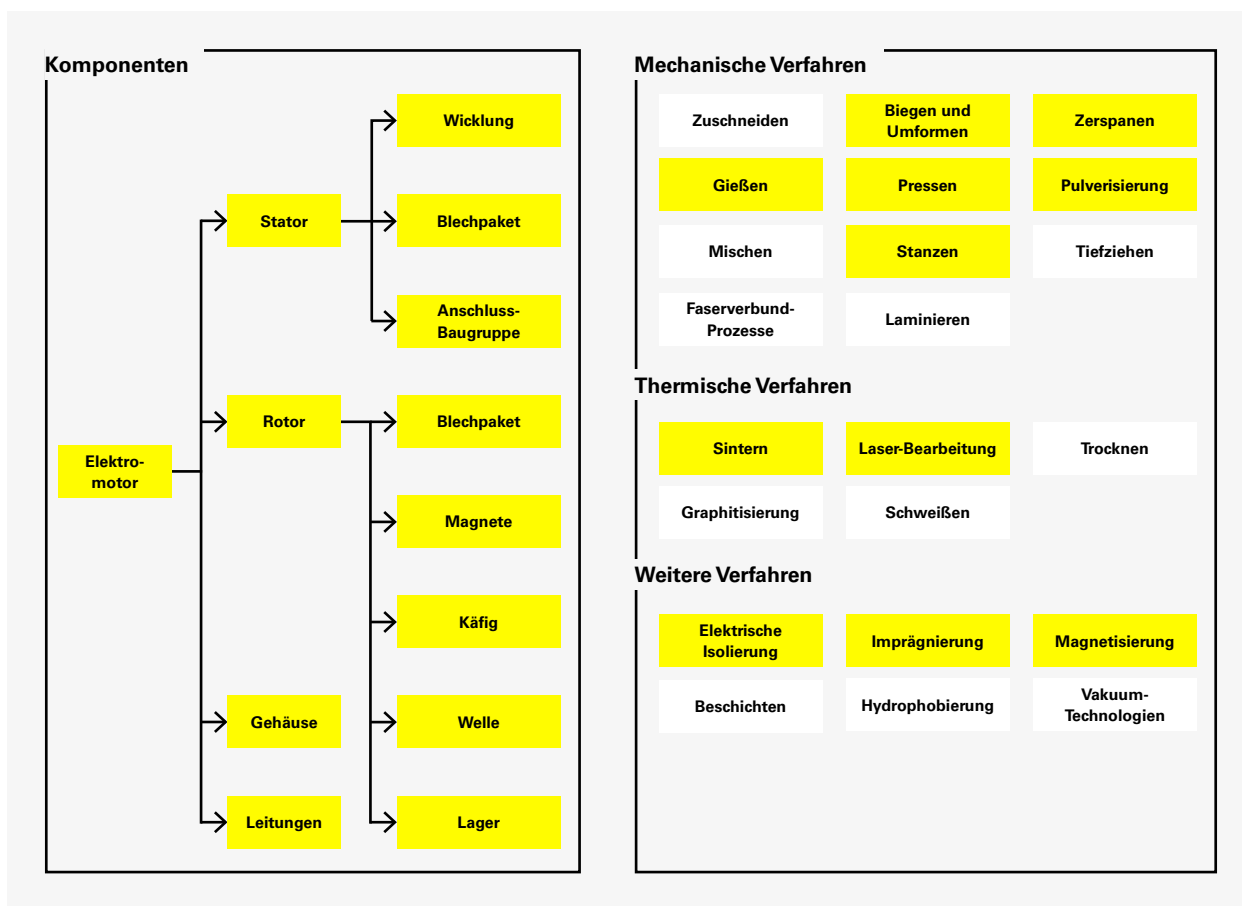
7 | Kampker et al. 2024b.

Die Kühlung des Stators kann entweder über einen außenliegenden Kühlmantel, eine aktive Wickelkopfkuhlung, eine direkte Blechpaketkuhlung durch eingestanzte Kanäle im Blechpaket, eine Festkörperkuhlung durch hochwärmeleitende Harze oder eine Kombination dieser Varianten erreicht werden. Häufig ist das Kühlsystem des Motors mit dem Kühlsystem der Leistungselektronik verbunden, sodass beispielsweise nur eine Kühlmittelpumpe und ein Kühlmittelbehälter für beide Komponenten benötigt werden.

Auch für den Rotor bildet die Basis das Blechpaket aus einzelnen dünnen Elektroblechen, die über einen Presssitz oder eine Feder-Nut-Verbindung mit der Rotorwelle des Elektromotors verbunden sind. Weitere eingesetzte Komponenten im Rotor unterscheiden sich je nach Rotortopologie. In permanent-

regten Synchronmaschinen (PSM) wird das magnetische Rotorfeld über Permanentmagneten erzeugt, die in der Regel zu großen Teilen aus Seltenen Erden bestehen, wie beispielsweise die üblicherweise eingesetzten Neodym-Eisen-Bor-Magnete. Die Magnete werden entweder in im Blechpaket eingestanzte Magnet Taschen oder außen auf den Rotor montiert und befestigt.¹ Die Befestigung der Magnete wird wahlweise über Klebstoff, über einen Spritzpress-Vorgang oder über mechanische Fixierungen realisiert. Die permanenterrregte Synchronmaschine ist die am häufigsten verwendete Bauform für Traktionsantriebe.² Da in der Lieferkette von Seltenen Erden eine starke Abhängigkeit von asiatischen Länder besteht, gewinnen fremderregte Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen in Deutschland und Europa zunehmend an Relevanz.

1 | Spring 2009.
2 | Drexler et al. 2025.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 30: Komponenten und Prozesse des Elektromotors

Das elektromagnetische Feld von fremderregten Synchronmaschinen (FSM) wird über Erregerwicklungen aus Kupferlackdraht erzeugt. Die Wicklungen bestehen zumeist aus Runddraht, der über ein Isolationspapier oder Kunststoffeinsätze vom Blechpaket getrennt wird. Die Versorgung der Wicklung im Rotor mit Gleichstrom durch die Leistungselektronik wird durch Schleifringe und Schleifkontakte realisiert^{1,2}. Aktuelle Entwicklungsbestrebungen bestehen zudem im Bereich der induktiven Leistungsübertragung für fremderregte Synchronmaschinen³. Sowohl fremd- als auch permanenterregte Synchronmaschinen haben in der Regel an den axialen Außenseiten des Rotorblechpakets zusätzliche Wuchtscheiben zum subtraktiven Wuchten auf der Welle montiert.

Auch Asynchronmaschinen (ASM) werden in Kurzschlussläufer-Bauform in Traktionsantrieben eingesetzt. Bei Asynchronmaschinen werden ebenfalls Nuten ins Blechpaket eingestanz. In diese Nuten werden entweder gewalzte Stäbe aus Kupfer oder Aluminium eingesetzt, die über Kurzschlussringe miteinander verbunden werden und einen Kurzschlusskäfig bilden, oder es wird ein Kurzschlusskäfig in das Blechpaket über ein Spritzgussverfahren gegossen. Das elektromagnetische Statorfeld induziert bei Asynchronmaschinen eine Spannung in die Rotorstäbe. Durch die Spannung fließt ein Strom im gesamten Kurzschlusskäfig, wodurch wiederum ein elektromagnetisches Feld um die Stäbe gebildet wird, das dem elektromagnetischen Feld des Stators folgt^{4,5}. Da nur durch unterschiedliche Geschwindigkeit von Rotor und Statorfeld

eine Spannung induziert werden kann, besteht ein Schlupf zwischen diesen.⁶

Neben den beschriebenen Radialflussmotoren gibt es eine Vielzahl an Forschungs- und Entwicklungsvorhaben für Axialflussmotoren. Da diese aktuell, insbesondere für Nutzfahrzeuganwendungen, noch keine übergreifende Serienreife erlangt haben und damit aktuell keine Relevanz in der Anwendung haben, werden ihre Funktionsweise und ihr Aufbau nicht näher erläutert. Die Hauptzielgrößen in der Auslegung und im Design von elektrischen Traktionsantrieben für Nutzfahrzeuge sind die Leistungsdichte und damit der benötigte Bauraum sowie das Verhältnis von kontinuierlich abrufbarer Leistung zur maximal abrufbaren Leistung. In Traktionsantrieben für Nutzfahrzeuge wird eine hohe Dauerlast bei gleichzeitig minimalem Bauraum angestrebt. Da permanent-erregte Synchronmaschinen von allen Radialflusstypologien die höchste Leistungsdichte aufweisen, werden im Nutzfahrzeugsegment aktuell fast ausschließlich PSM eingesetzt. Zusätzlich wird in der Beschaffung und damit in der Kostenstruktur hauptsächlich auf die TCO geachtet. Durch die höhere Effizienz der PSM und die damit verbundenen Einsparungen im Strom werden gegebenenfalls höhere Kosten durch Permanentmagnete ausgeglichen. In der folgenden Beschreibung der Wertschöpfung sowie der benötigten Kernkompetenzen wird daher hauptsächlich die PSM betrachtet. Die zugehörige Kostenstruktur ist in der folgenden Grafiken dargestellt.

- 1 | Schröder und Kennel 2021.
- 2 | Gerling 2022.
- 3 | MAHLE GmbH 2024.
- 4 | Spring 2009.
- 5 | Binder 2017.
- 6 | Neudorfer 2009.

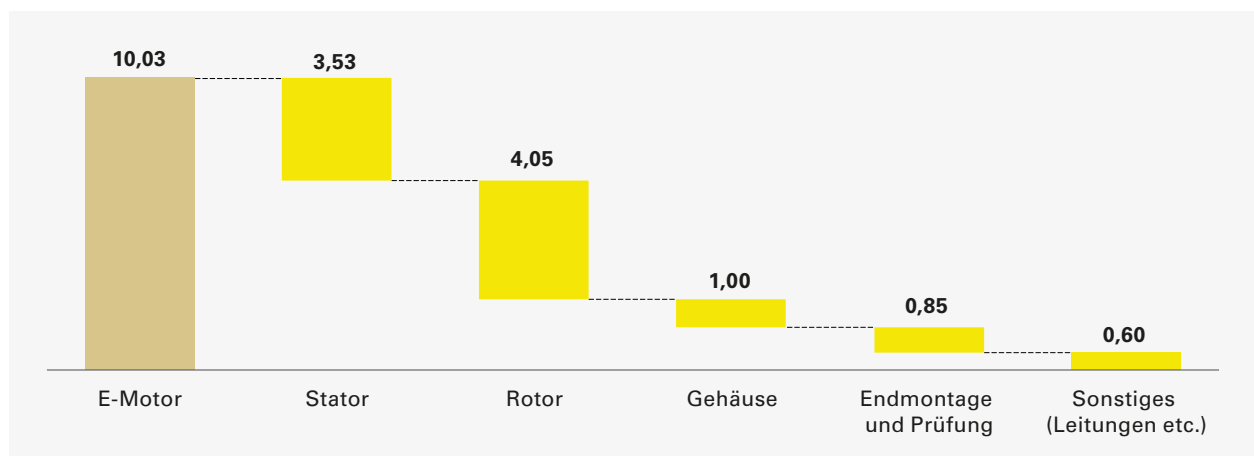


Abbildung 31: Kostenstruktur des Elektromotors (in €/kW)

Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026



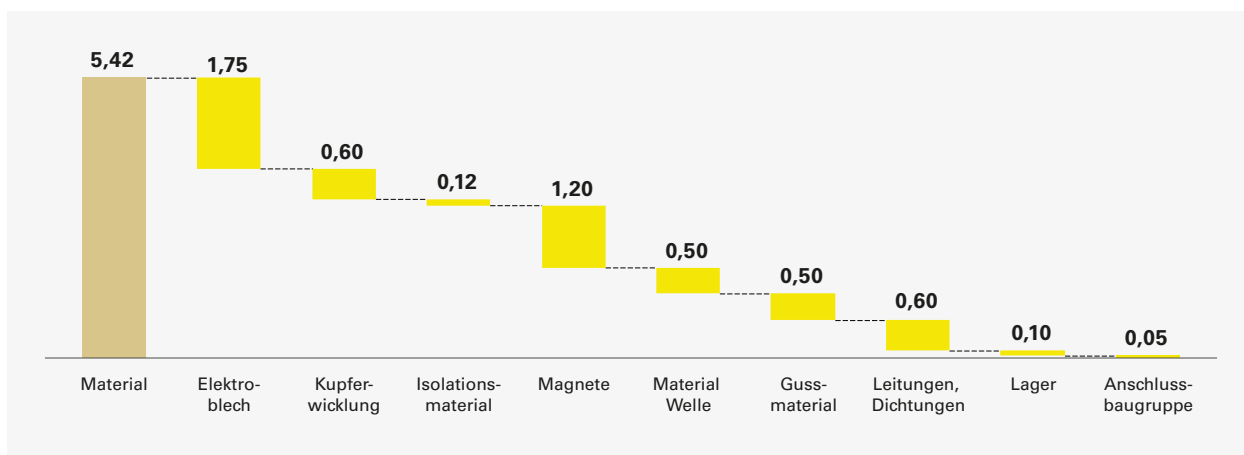
Die Statorproduktion mit Flachdrahttechnologie ist weniger flexibel, dafür jedoch für große Stückzahlen leichter zu automatisieren. Aufgrund der niedrigen Variantenflexibilität muss in der Regel für jedes Elektromotordesign eine dafür angepasste Produktionslinie beschafft werden. Dies erzeugt insbesondere für kleinere Stückzahlen wie im Nutzfahrzeugbereich hohe initiale Investitionskosten für die Serienfertigung von Elektromotoren und deren Komponenten. Die folgende Wertschöpfungs- und Kostenübersicht unterliegt dieser Annahme. Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass die Kostenstrukturen in der Elektromotorenproduktion stark von der Stückzahl, dem Design und den eingesetzten Materialien abhängig sind. Im angenommenen Szenario hat das Nutzfahrzeug einen Elektromotor in PSM-Bauform mit einer maximalen Leistung von 500 kW bei einer jährlich produzierten Stückzahl von 15.000 Einheiten. Hauptkostentreiber sind, wie in Abbildung 31 dargestellt, die Aktivkomponenten Stator und Rotor, die kumuliert etwa 75% der Gesamtkosten des Elektromotors ausmachen. Grund dafür sind die fertigungstechnische Komplexität und der hohe Materialeinsatz. Zusätzliche Kosten entstehen für das Gehäuse sowie für die Endmontage und die Prüftechnik. Kosten für Peripherie-Komponenten sind verhältnismäßig gering.

Wertschöpfung

Teilt man die Kostenstruktur für den Elektromotor nach Material- und Fertigungswertschöpfung auf, zeigt sich, dass die materialbezogenen Kosten die Fertigungskosten knapp übersteigen (Abbildung 32). Etwa 54 % der Kosten des Elektromotors ergeben sich durch Materialkosten. Insbesondere das Elektrolech, zusammengenommen für den Stator und den Rotor, hat einen hohen Preisanteil, zu dem die Fertigungskosten zum Stanzen und Paketieren hinzugerechnet werden müssen. Im Markt für Elektrolech existiert ein Preiskampf zwischen asiatischen und europäischen Herstellern. Europäische und insbesondere deutsche Hersteller sind meist teurer, reduzieren aber andererseits durch Innovationen ihre CO₂-Ausstöße¹, um so langfristig durch Emissionsreduktionsmechanismen wie EU-ETS und CBAM wettbewerbsfähig zu bleiben.

Ein weiterer hoher Kostenfaktor sind die Magnete. Die Wertschöpfung in der Herstellung der Magnete findet hauptsächlich in Asien statt. Aufgrund bestehender Regulationen durch die chinesische Regierung dürfen hauptsächlich nur dann Seltene Erden exportiert werden, wenn sie bereits zu Permanentmagneten weiterverarbeitet wurden. Da Seltene Erden

1 | Thyssenkrupp 2023.



Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

Abbildung 32: Materialkosten im Elektromotor (in €/kW)

fast ausschließlich in China raffiniert werden¹, ist in Europa in der Herstellung von Magneten nur sehr begrenzt Wertschöpfung möglich. Weitere Kostenfaktoren sind der isolierte Kupferdraht mit etwa 7%, dessen Kosten hauptsächlich durch den Kupferpreis getrieben sind. Die Drahtisolation wird entweder über einen Lackier- oder einen Extrudierprozess auf den Draht aufgetragen. Leitungen und Dichtungen machen etwa 6% der Kosten aus.

In der Fertigung ergeben sich die Hauptkosten durch die Fertigung der Aktivkomponenten sowie durch Endmontage- und Prüfprozesse. Insbesondere die Statorfertigung unterliegt mit der benötigten komplexen Prozesstechnik wie der Laserschweißzelle, Biege- und Schränkstationen, Öfen zum Aushärten und dem sensiblen Handling vieler unterschiedlicher Pingeometrien hohen Investment-, Energie- und Personalkosten, welche die Produktionskosten erhöhen (Abbildung 33).

Die Rotorfertigung ist im Vergleich zur Statorfertigung aufgrund kürzerer Prozessketten und niedrigerer Komplexität günstiger. Eine hohe Wertschöpfung außerhalb der Aktivkomponentenfertigung liegt im Gehäuse und in der Welle. Das Gehäuse des Elektromotors wird meist über ein Druck- oder Stranggussverfahren aus Aluminium gefertigt. Die Rotorwelle wird über Stauch- oder Fließrollierprozesse sowie spanende Bearbeitungsprozesse hergestellt.² Für beide Komponenten ergeben sich jeweils 50% der Kosten durch wert-

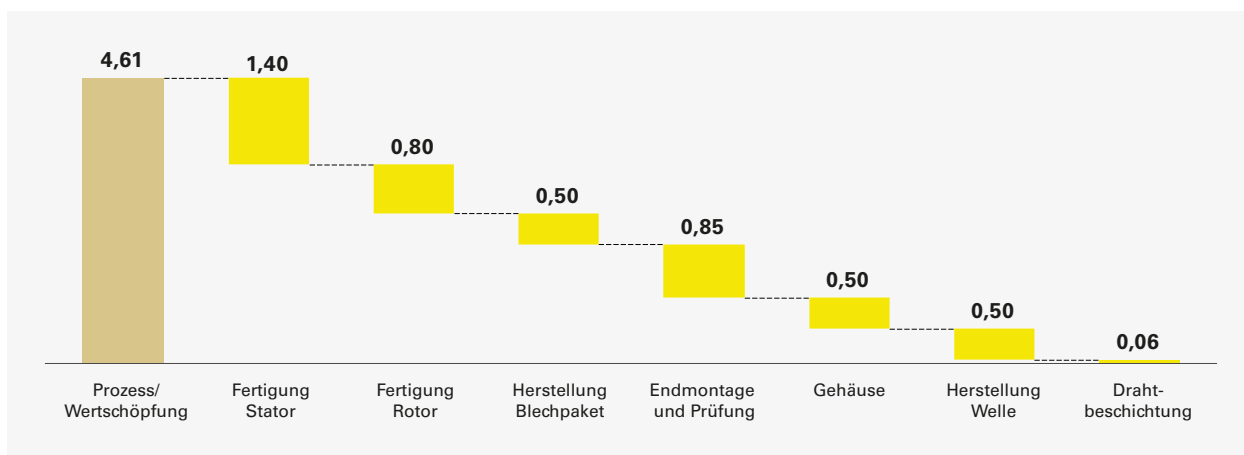
schöpfende Fertigungsprozesse und 50% durch das jeweilige Ausgangsmaterial.

Potenziale durch Skalierung und Innovationen

Im Nutzfahrzeubbereich sind die aktuellen Preisstrukturen für E-Motoren aufgrund der im Vergleich zum PKW-Segment deutlich geringeren Stückzahlen stark von den Fertigungskosten geprägt. Insbesondere die Flachdraht-Stator-Fertigung, die Rotorfertigung sowie End-Montagestationen und die Testing-Infrastruktur erfordern hohe Investitionen in Anlagen und Betriebsmittel. Hinzu kommen hohe Werkzeugkosten in der Blechpaket-Fertigung sowie im Gießprozess der Gehäuse. Diese fertigungsspezifischen Kostenanteile bieten bei höheren Stückzahlen durch Skalierungseffekte deutliche Einsparungspotenziale. Mit steigenden Stückzahlen können Fixkosten besser verteilt, Werkzeuge effizienter ausgelastet und somit die Stückkosten der E-Motor-Fertigung im Nutzfahrzeugsegment perspektivisch deutlich reduziert werden.

Durch aktuelle Trends und Entwicklungen zu innovativen Kühl- und Wicklungskonzepten im Elektromotor wird eine Reduktion des eingesetzten Materials ermöglicht. Als Beispiele für Kühlkonzepte ist die Nutinnenkühlung, die direkte Blechpaketkühlung und die direkte Wickelkopfkühlung zu nennen. Die Kühlung ist insbesondere bei Elektromotoren von Nutzfahrzeugen wichtig, um eine hohe kontinuierliche Leistung

1 | Elsner et al. 2025.
2 | Kampker et al. 2024c.



Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

Abbildung 33: Wertschöpfung im Elektromotor (in €/kW)

sowie eine hohe Effizienz zu ermöglichen. Wickelkonzepte wie die kontinuierliche Wellenwicklung, der Short-Pin und der X-Pin ermöglichen zusätzliche Material- und Bauraumreduktionen. Da diese Konzepte höhere Aufwände in der Produktion erfordern, verschiebt sich die Wertschöpfung zu Teilen von der Materialproduktion hin zur Materialverarbeitung.

Kompetenzen in der Wertschöpfungskette

In der Wertschöpfungskette von Elektromotoren gibt es entsprechend der hohen Variantenvielfalt im Produktdesign ebenso eine Vielzahl unterschiedlicher Prozessalternativen im Herstellungsprozess. Die wichtigsten Prozess-Kompetenzen für eine PSM mit Flachdraht-Stator sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die Wertschöpfungskette ist hauptsächlich von klassischen umformenden und spanenden Prozessen geprägt, wie beispielsweise dem Stanzen, Zerspanen, Pressen oder Schmieden. Das gilt insbesondere für das Blechpaket, das Gehäuse und die Welle. Zur elektrischen Isolierung der Komponenten werden unterschiedliche Prozesse der Kunststoff- und Lackverarbeitung benötigt, insbesondere unterschiedliche Beschichtungs-Spritzguss und Extrusionsverfahren. Ein Komplexitätstreiber in der Herstellung von Elektromotoren liegt in der Wicklungsherstellung durch die engen Toleranzfelder beim Biegen, Schweißen und beim Handling von Flachleitern aus Kupferdraht.

Für den klassischen Maschinenbau unbekanntere Kompetenzen finden sich in der Magnetverarbeitung. Magnetsinter- und Magnetisierungsprozesse sowie das Handling von Permanentmagneten im Prozess stellen hier Herausforderungen dar.

Zentrale Erkenntnisse der Wertschöpfungsanalyse des E-Motors

- Stator und Rotor machen ca. 75% der Gesamtkosten aus.
- Materialkosten übersteigen die Fertigungskosten mit 54% knapp
- Fünf kritische Kernkompetenzen: Blechpaketfertigung, Wicklungstechnologie (Hairpin/Flachdraht), Rotorfertigung, Gehäuse-/Kühlsystemintegration, Prüftechnik

Komponenten		Top-1-Kompetenz	Top-2-Kompetenz	Top-3-Kompetenz
Stator	Blechpaket	Pressen	Stanzen	Beschichten
	Wicklung	Biegen	Schweißen	
	Isolationssystem	Beschichten	Imprägnieren	Extrudieren
	Anschlussbaugruppe	Stanzen	Biegen	Kunststoff-Spritzguss
Rotor	Blechpaket	Pressen	Stanzen	Beschichten
	Magnete	Sintern	Magnetisieren	
	Welle	Schmieden	Spanen	Wärmebehandlung
	Lager	Schmieden	Spanen	Wärmebehandlung
Gehäuse	Gehäuse	Druckguss	Spanen	Metall-Extrudieren
Sonstiges	Dichtungen	Spritzguss		
	Wuchtscheiben	Spanen		

Tabelle 4: Kompetenzen in der Wertschöpfungskette von Elektromotoren

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

5.2.4 Leistungselektronik

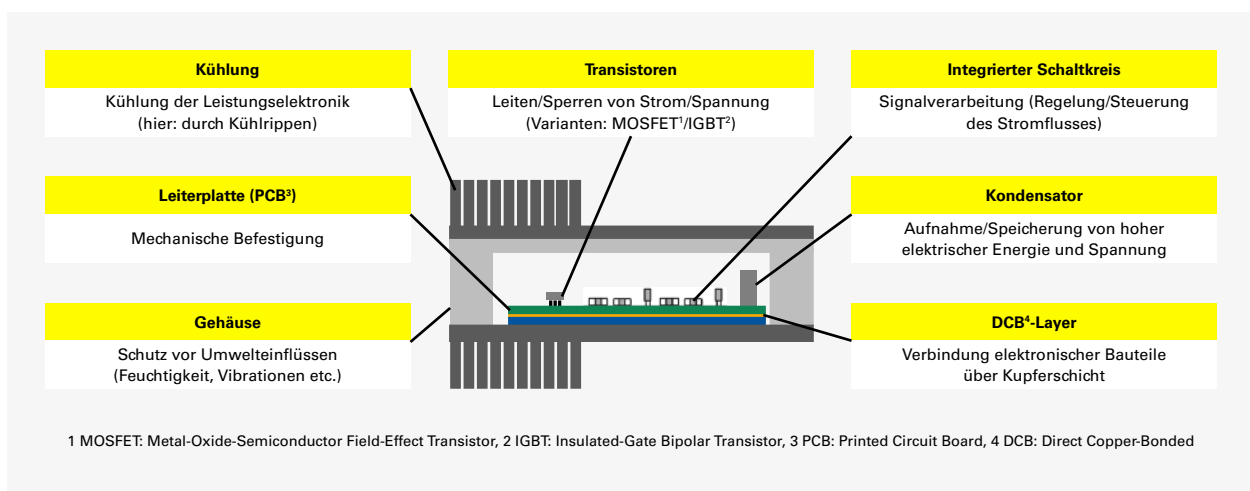
Leistungselektronische Wandler bilden die zentrale Verbindung zwischen elektrischer Energiequelle und Verbraucher. Ihre Aufgaben umfassen die gezielte Steuerung der Leistungsflüsse sowie die Wandlung zwischen Gleich- und Wechselspannungen. Grundlage dieser Funktionalität sind schaltende Halbleiterbauelemente.¹

Für den Elektromotor übernehmen Wechselrichter die Aufgabe, die anliegende Gleichspannung so umzuwandeln, dass rechteckförmige Phasenspannungen an den Motoranschlüssen erzeugt werden. Durch die Einstellung der Tastraten in der Pulsweitenmodulation wird dabei ein insgesamt sinusförmiger Phasenstrom mit der gewünschten Amplitude und Frequenz übertragen, was eine präzise Regelung von Drehmoment und Drehzahl ermöglicht. Aktuelle Traktionsinverter-Trends zeigen, dass sich durch Effizienzoptimierungen sowohl im Antrieb als auch im Wechselrichter Reichweite steigern und Kosten senken lassen. Zentral ist dabei, dass das Betriebs- und Modulationsverhalten des Wechselrichters sowohl dessen eigene Verluste als auch die des Motors beeinflusst. Ein Beispiel ist der Einsatz von SiC-Halbleitern anstelle klassischer Si-Bauelemente: Die Schaltverluste können dadurch deutlich

reduziert und die Gesamteffizienz erhöht werden.² In der Automobilindustrie sind dreiphasige Zwei-Level-Inverter in B6-Schaltung (sechs Halbbrücken) etabliert, da sie strukturell einfach und robust sind. Bei höheren Systemspannungen, wie sie auch bei Nutzfahrzeugen auftreten, steigen modulationsinduzierte Verluste, die etwa ein Drittel der gesamten Antriebsverluste ausmachen. Durch den Einsatz dreiphasiger Drei-Level-Inverter lassen sich diese Verluste jedoch deutlich reduzieren.³ Insgesamt werden etwa 50% der Verluste des elektrischen Antriebsstrangs, das Getriebe ausgenommen, durch den Inverter verursacht.⁴ Der generische Aufbau einer Leistungselektronik ist in der folgenden Abbildung 34 dargestellt.

Die Basis der Leistungselektronik bildet die DCB-Schicht (Direct Copper Bonded), die aus Al2O3-Keramikpulver und Kupfer gefertigt wird. Die DCB-Schicht dient als Verbindungselement der elektronischen Bauteile der Leistungselektronik. Leiterplatten wiederum dienen als mechanischer Träger und elektrisches Verbindungssystem. Sie führen Signale und Leistung, sichern Isolationsabstände und unterstützen die Wärmeabfuhr. Sie bestehen aus einem mehrlagigen Verbund aus Glasfaser/Epoxid mit Kupferfolien.

1 | Kampker und Heimes 2024.
 2 | Sachs und Neuburger 2025.
 3 | Sachs et al. 2024.
 4 | Sachs und Neuburger 2025.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 34: Generische Produktarchitektur der Leistungselektronik

Für Leistungselektroniken für Traktionsantriebe kommen heute bevorzugt Halbleiter aus Siliziumkarbid (SiC) zum Einsatz, da mit ihnen, gegenüber reinem Silizium, deutlich schnellere Schaltvorgänge realisiert werden können. Das resultiert in sinkenden Schaltverlusten und – bei gleicher Leistungsklasse – in höheren Schaltfrequenzen, wodurch die erreichbare Leistungsdichte steigt.¹ Eine weitere Alternative, die sich in der Entwicklungsphase befindet, sind Halbleiterelemente aus Galliumnitrid (GaN). GaN-Bauelemente decken typischerweise etwas niedrigere Leistungsklassen ab als SiC, schalten dafür aber schneller.² Halbleiterelemente, wie MOSFETs oder IGBTs, werden als Leistungsschalter zur Generierung von Steuersignalen zur Pulsweitenmodulation sowie zum Abführen von Überspannungen und zur Kontrolle des Ladens des Zwischenkreises eingesetzt. Dioden dienen als Gleichrichter sowie zur Begrenzung von Überschwüngen. Isolationshalbleiter entkoppeln den Hochvolt-Leistungsteil von der Niedervolt-Steuerung. Je nach Aufbau des Halbleiters ist dieser aktiv schaltbar oder rein passiv.

Kondensatoren in Leistungselektroniken dienen unter anderem zur Glättung von Spannungen und Strömen, als Filter oder zur Pufferung von Energie im DC-Zwischenkreis. Es werden hauptsächlich Folienkondensatoren, Elektrolytkondensatoren sowie Keramik Kondensatoren in Leistungselektroniken eingesetzt.³ Folien- und Keramik Kondensatoren werden als Zwischenkreiskondensatoren oder für Snubber-Schaltungen eingesetzt,⁴ Keramik Kondensatoren fast ausschließlich als Zwischenkreiskondensatoren.⁵ Elektrolytkondensatoren sind für den Einsatz in Nutzfahrzeugen aufgrund ihrer geringen Lebensdauer nicht geeignet und werden daher nicht näher beschrieben.⁶

Transformatoren werden in Leistungselektroniken zum Wandeln von Spannungen und Strömen eingesetzt. Je nach Aufgabenbereich werden Transformatoren über ihre Magnetkernform und das entsprechende Material sowie den eingesetzten elektrischen Leiter unterschieden. Die Basis eines Transformators bilden die Kerne aus einem Ferrit, Eisen, einer Eisenlegierung oder einer amorphen oder nanokristallinen Legie-

rung. Je nach Ausprägung werden dabei die Kerne aus Vollmaterial, laminierten Platten oder einem gesinterten Pulver gefertigt.⁷

Zur Kühlung der Leistungselektronik gibt es in Abhängigkeit vom Design und der benötigten Kühlleistung unterschiedliche Konzepte. Unterhalb der DCB-Schicht wird häufig eine Grundplatte aus Kupfer oder Aluminium angebracht, welche die Wärmeabgabe in Richtung Gehäuse erhöht.⁸ Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Verbindung der Leistungsmodule mit einem Kühlkörper durch den Einsatz von sogenannten „Thermal Interface“-Materialien, beispielsweise thermische Fette mit keramischen oder metallischen Füllstoffen, Silikongele mit eingebetteten Partikeln oder Phasenwechselmaterialien. Bei höheren Kühlleistungen werden zudem Flüssigkühlungen, wie die Wasserkühlung, eingesetzt. Das Flüssigkühlsystem der Leistungselektronik ist häufig mit dem Kühlsystem des Elektromotors verbunden, wodurch Komponenten geteilt werden können.

Die Leistungselektronik wird durch ein Gehäuse vor Umgebungseinflüssen geschützt. Für Traktionsanwendungen besteht das Gehäuse meistens aus Aluminium. Häufig wird das Gehäuse mit isolierendem Silikongel gefüllt.⁹ Zur Überwachung und Messung von Temperaturen und Strömen in der Leistungselektronik werden unterschiedliche Sensorarten wie Shunt-Widerstände oder Temperatursensoren eingesetzt. Die Tabelle 4 fasst die Komponentenstruktur des Elektromotors und die notwendigen Kompetenzen zu dessen Herstellung zusammen.

1 | Wienhausen 2019.

2 | Tung 2023.

3 | Chowdhury et al. 2022.

4 | Ramos 2018

5 | Wang und Blaabjerg 2014.

6 | Chowdhury et al. 2022

7 | Valchev und van den Bossche 2018.

8 | Broughton et al. 2018.

9 | Yang et al. 2013.

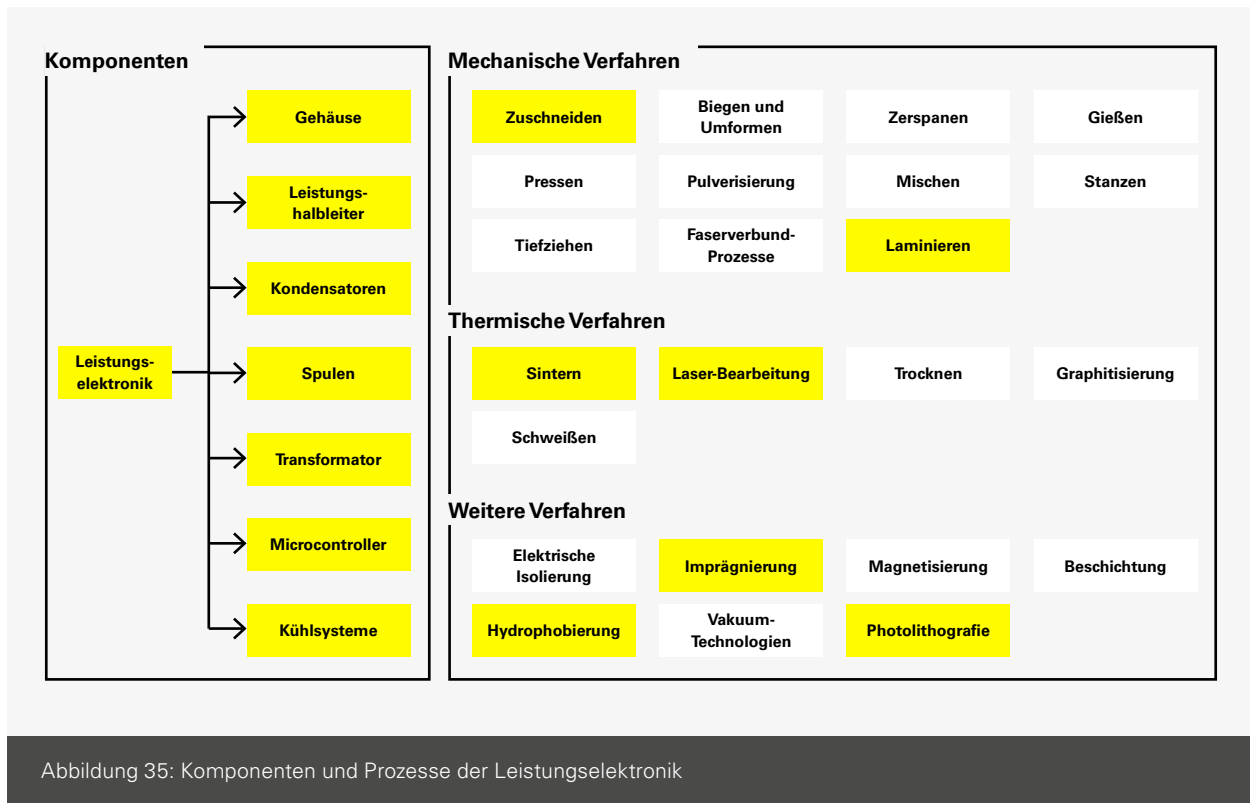


Abbildung 35: Komponenten und Prozesse der Leistungselektronik

Die Produktion der Leistungselektronik ist von komplexen Produktionsprozessen geprägt, die in Abbildung 35 gegliedert dargestellt sind.

Die DCB-Schicht besteht aus Al_2O_3 -Keramikpulver mit einem Sinteradditiv, das foliengegossen und anschließend gesintert wird. Auf diese Keramikschiicht wird anschließend eine Aluminiumoxidschiicht aufoxidiert, die anschließend mit einer Kupferfolie beschichtet wird.¹ Die Kupferoberfläche wird mit einer Schutzschicht maskiert und abschließend über eine UV-Belichtung endbearbeitet.

Der Produktionsprozess von Leiterplatten beginnt mit der Herstellung der Innenlagen, die die Basis des späteren Multilayer-Aufbaus bilden. Jede Innenlage besitzt einen Kern aus Epoxidharz, der mit Glasgewebe und Kupferfolie beschichtet wird.² Auf die äußeren Kupferflächen wird eine lichtempfindliche Folie (Fotoresist) laminiert. Mittels UV-Belichtung wird das Leiterbild auf die Oberfläche übertragen. Dabei härtet der

Fotoresist in den belichteten Bereichen aus. In den unbelichteten Zonen wird der Fotoresist durch eine Sodalösung entfernt. Das nun freiliegende, nicht für Leiterbahnen benötigte, Kupfer wird anschließend mit einer alkalischen, ammoniakbasierten Ätzlösung abgetragen, während das Kupfer unter den ausgehärteten Resistbereichen erhalten bleibt. Zum Abschluss wird der ausgehärtete Fotoresist vom Kupfer entfernt, wodurch eine fertige Innenlage der Leiterplatte entsteht. Mehrere dieser Innenlagen werden anschließend zu einem Stapel (Stack) aufgebaut. Zwischen den Lagen dienen Prepregs als isolierende und klebende Zwischenschichten, die über einen Aufheizprozess aufgeschmolzen werden und die Lagen miteinander verkleben. Die Außenseiten des verpressten Stapels werden mit einer Kupferfolie bedeckt, um die späteren Außenlagen zu bilden. Im nächsten Schritt werden elektrische Durchkontaktierungen der Innenlagen zur mechanischen Befestigung eingebracht, die über eine Kupferbeschichtung (etwa 1 μm) mittels galvanischer Abscheidung leitfähig gemacht werden. Anschließend werden die Außenlagen mit

1 | Reinhardt et al. 2010.
2 | Canal Marques et al. 2013.

Fotoresist laminiert und über UV-Belichtung geätzt und strukturiert. Auf den Lochwandungen werden weitere rund 20 µm Kupfer abgeschieden, um robuste Durchkontaktierungen zu gewährleisten. Zum Schutz des aufgebauten Kupfers während des Ätzprozesses wird eine Zinnschicht galvanisch aufgebracht, die als Ätzresist dient. Anschließend wird der Fotoresist der Außenlagen abgewaschen und das ungeschützte Kupfer in den Außenlagen mit einer stark alkalischen Lösung weggeätzt, sodass nur die gewünschten Leiterbahnen, Flächen und Pads unter der Zinnschicht erhalten bleiben. Anschließend werden die endgültigen Kupferbahnen wieder freigelegt.¹ Zum Abschluss der Leiterplattenfertigung wird eine Lötstopmmaske aufgebracht und die vorgesehenen Lötstellen werden mittels UV-Belichtung präzise freigelegt. Auf die Lötstellen wird eine Lötpaste aufgetragen. Die Leiterplatten können anschließend mit den elektronischen Bauteilen bestückt und im Anschluss verlötet werden.²

Die Fertigung von Halbleiterelementen beginnt mit dem Substrat. Das Ausgangsmaterial wird geschmolzen, zu einem Block geformt und auf einen gleichmäßigen Durchmesser geschliffen. Aus diesem Block werden mittels Laser 0,5 bis 0,75 mm dicke Platten, sogenannte Wafer, geschnitten. Die Waferoberfläche wird anschließend geglättet, geätzt, poliert und gereinigt, um eine Basis für die Strukturierung zu schaffen. Zur Ausbildung der integrierten Schaltkreise wird auf die Waferoberfläche ein Fotolack aufgetragen. Mithilfe einer Maske werden die zu strukturierenden Bereiche definiert und per UV-Belichtung im Fotolack markiert. In den belichteten beziehungsweise unbelichteten Zonen wird der Fotolack anschließend selektiv entwickelt und die darunterliegenden Materialschichten werden entsprechend partiell abgetragen beziehungsweise geätzt.³ An den Wänden der geätzten Gräben wird eine Oxidschicht entwickelt. Anschließend wird in den Gräben ein Polysilizium abgeschieden, das die Gräben füllt. Um die Gräben herum werden Kanäle definiert, die anschließend kontaktiert werden. Auf diese Weise entsteht auf einem Wafer eine Vielzahl von Halbleiterelementen mit jeweils integrierten Schaltkreisen.⁴ Die einzelnen Kanäle werden über eine Schicht auf der Oberseite aus Aluminium oder einer Alu-

minium-Kupfer-Legierung verbunden, die abgeschieden und strukturiert wird. Im Anschluss werden die Halbleiterelemente per Laserschneidprozess vereinzelt, auf einem Leiterrahmen platziert und mit Harz befestigt. Die elektrische Kontaktierung erfolgt über Gold-Drähte, die den integrierten Schaltkreis des Halbleiters mit den Anschluss pads des Leiterrahmens verbinden. Zur Stabilisierung und zum Schutz werden die montierten Halbleiterchips mit Epoxidharz vergossen. Die Leiterrahmen-Stifte ragen hierbei zur späteren elektrischen Kontaktierung heraus.⁵

Bei Folienkondensatoren wird eine Kunststoffolie im Vakuum mit einer sehr dünnen Lage aus Aluminium oder einer Zinn-Aluminium-Legierung beschichtet. Anschließend wird die Kunststoffolie zugeschnitten und gewickelt oder gestapelt. Zur Kontaktierung werden die Enden mit Zinn, Zink oder Aluminium bedeckt. Der Kondensator wird mit einem Öl, Wachs oder Harz imprägniert, anschließend kontaktiert und in ein Gehäuse eingebracht.⁶ In Keramik-kondensatoren dient eine Keramik als Dielektrikum. Dazu wird zuerst ein Keramikpulver, häufig aus Bariumtitanat, als dünnes Band gegossen, wodurch eine flexible Keramikfolie entsteht. Anschließend wird eine Innenelektrode aus Nickelpaste aufgetragen. Einzelne Lagen der beschichteten Keramikfolie werden laminiert. In einem Ofen werden Binder ausgetrieben und die Keramikschicht gesintert. Die Enden werden mit einer Silber-/Nickel-Schicht zur Kontaktierung beschichtet und anschließend mit einer galvanischen Schicht geschützt.⁷

Die Basis eines Transformators bilden die Kerne aus einem Ferrit, Eisen, einer Eisenlegierung oder einer amorphen oder nanokristallinen Legierung. Je nach Ausprägung werden dabei die Kerne aus Vollmaterial, laminierten Platten oder einem gesinterten Pulver gefertigt.⁸ Die Leiterwicklung wird um diesen Kern gewickelt⁹ und kann aus Volldraht, Litze oder einer Metallfolie bestehen. Alternativ kann die Wicklung auch als kernlose Luftpule gewickelt werden. An die Wicklungen werden Anschlüsse angelötet oder angeschweißt. Über Ferrit-Halbschalen werden die Luftspalte zwischen den Kernen eingestellt. Abschließend wird das System mit Epoxidharz

1 | Sepaintner et al. 2020.

2 | Sankar et al. 2022.

3 | Wein 1988.

4 | Khan et al. 2021.

5 | Lee et al. 2023.

6 | Tan und Wu 2022.

7 | Laadjal und Cardoso 2023.

8 | Valchev und van den Bossche 2018.

9 | Jou et al. 2024.

vergossen. Für Traktionsanwendungen besteht das Gehäuse meistens aus Aluminium und wird über ein Druckguss- oder Sandgussverfahren hergestellt.

In dem betrachteten Szenario belaufen sich die Kosten auf 8,80 € pro kW Maximalleistung des Motors. Die Kosten verteilen sich breit über die Komponenten (Abbildung 36): den größten Anteil tragen die elektrischen Baugruppen: SiC Halbleitermodule inklusive DCB, DC Link Kondensatoren, die Steuer/Messplatine sowie EMV Filter. Zahlreiche kleinere Teile wie Busbars, Befestiger und Dichtungen werden unter „Sonstiges“ zusammengefasst. Neben den Materialien prägen die Bestückung, die Endmontage und Integration sowie das Testen der Leistungselektronik die Gesamtsumme wesentlich.

In der Aufteilung der Kosten nach Material- und Wertschöpfungsanteilen (Abbildung 37) entfallen etwa 38% auf Materialien, der Rest auf die Prozessschritte entlang der Produktion (von Wafer- und Modulfertigung über PCB-Herstellung bis zur Endmontage und Prüfung). Bei den Halbleitern dominiert kostenseitig das hochreine SiC als Substrat-Material. Bei dem DCB-Grundsubstrat sind die Keramikrohmaterialien (zum Beispiel Al₂O₃/AlN) sowie Aluminium- und Kupferhalbleitungen die Kostentreiber. Kontaktmaterialien wie Silberpaste, Lote sowie Kupfer-/Al-Clip- und Bonddrähte tragen ebenfalls einen relevanten Preisanteil. Bei Kondensatoren (Folienkondensatoren) ist die metallisierte Kunststoffolie der Hauptkostenfaktor.

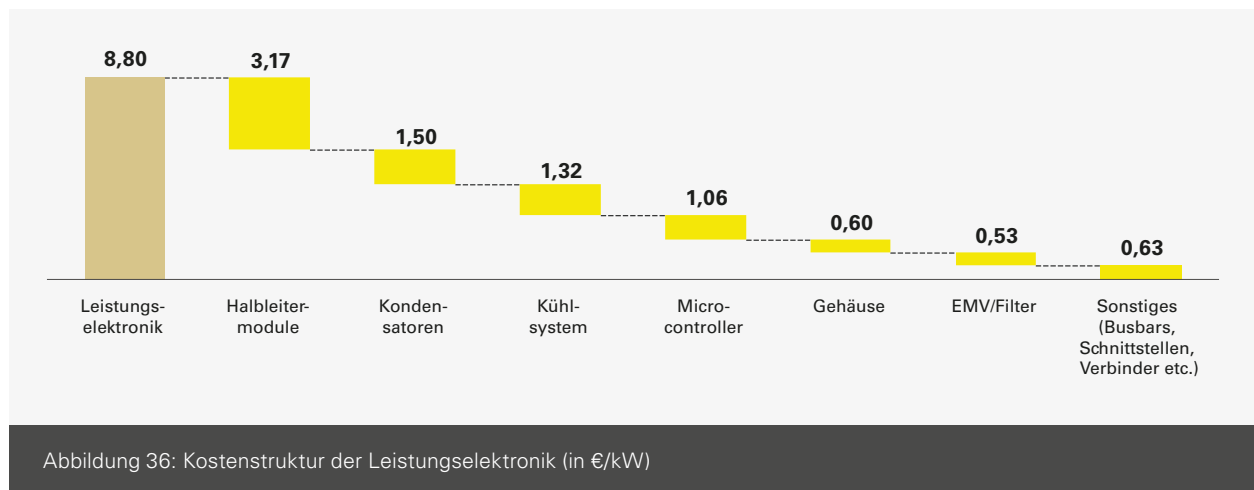


Abbildung 36: Kostenstruktur der Leistungselektronik (in €/kW)

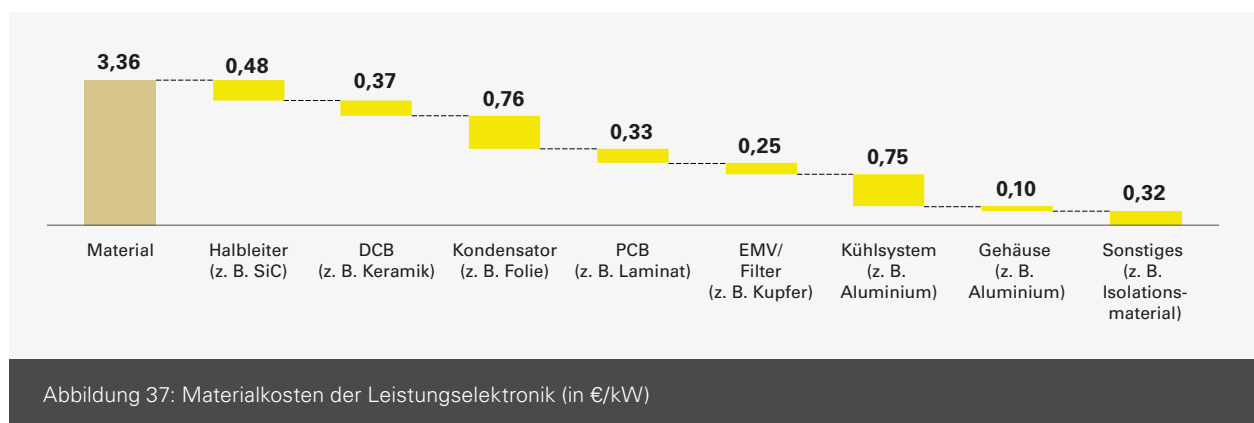


Abbildung 37: Materialkosten der Leistungselektronik (in €/kW)

Auf der Leiterplatte prägen PCB Laminate und passive Keramikbauteile sowie Steckverbinder den Materialkostenanteil. Der Materialpreis von EMV Filtern basiert vor allem auf Ferritbeziehungsweise Pulverkernen und Kupferlackdraht. Das Kühlsystem weist ebenfalls einen sehr hohen Materialanteil auf, insbesondere durch Aluminium- und Kupfersegmente, Dichtungen und Sensorik.

Die Wertschöpfungsschritte in der Leistungselektronik sind insgesamt investitionsintensiv und prozessual komplex (Abbildung 38). Der größte Prozesskostenblock entsteht durch die Endmontage und Integration aller Baugruppen sowie die umfangreichen Prüfungen wie Hochspannungs-, Isolations- und Dichtigkeitsprüfungen.

Direkt dahinter folgt kostenseitig die Halbleiterfertigung samt Modulpaketierung, getrieben durch höchste Präzisionsanforderungen bei Lithografie, Metallisierung und der Herstellung feinsten Leiterstrukturen sowie strenge Qualitätsvorgaben. Kostentreiber in der DCB Fertigung sind das mehrfache Fügen von Kupfer und Keramik (DCB/AMB), thermische Zyklen, Planarisierung und Inspektionen. In der Kondensatorproduktion treiben Vakuum Metallisierung, Zuschneiden und Wickeln sowie die Vakuum Imprägnierung den Aufwand. Bei der Leiterplatte treiben das Belichten und Ätzen, Bohr-/Plattierprozesse und Löten den Preis. Für die Kühlung sind je nach Auslegung präzise spanende Bearbeitung, Fügeprozesse (Hartlöten, Schweißen), Oberflächenbehandlungen, Reinigung und Druck- und Dichtigkeitsprüfungen maßgeblich. Zu-

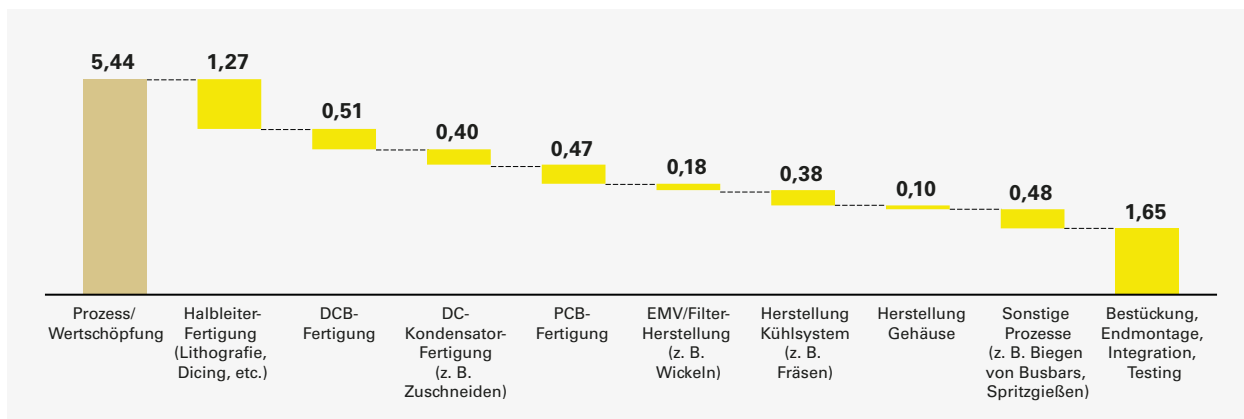
sammen ergeben diese Schritte den dominanten Wertschöpfungsanteil der Leistungselektronik.

Potenziale durch Skalierung und Innovationen

Auch die Preisstrukturen der Leistungselektronik sind im Nutzfahrzeugbereich aufgrund geringer Stückzahlen aktuell noch stark von Fertigungs- und Anlagenkosten geprägt. Investitionsintensiv sind beispielsweise Modulpaketierung, Kondensatorfertigung, PCB Herstellung/Bestückung, Endmontage sowie Dichtigkeitsprüfungen und HV /EOL Tests. Gleichzeitig werden viele Standardbauteile global in Großserie produziert¹, wodurch die Preise nur begrenzt durch Skalierung der Nutzfahrzeug-Inverterfertigung gesenkt werden können. Für SiC Halbleiter senken die Skalierung der gesamten Branchen und Volumenverträge die Bauteilpreise.

Innovation in der Leistungselektronik erschließt künftig hauptsächlich technische Potenziale: SiC/GaN und damit einhergehende höhere Schaltfrequenzen reduzieren DC Link, Drei Level Topologien senken Verluste und Kühlbedarf, fortgeschrittenes Packaging (Doppelseitige Kühlung, integrierte Busbars) und additiv gefertigte Kühlplatten verkürzen Montagezeiten und sparen Material. Da diese Ansätze höhere Prozessanforderungen mit sich bringen, verlagert sich Wertschöpfung teils vom Material hin zur Verarbeitung. Auf Gesamtantriebsstrang-Ebene können jedoch Innovationen in der Leistungselektronik Material- und Fertigungskosten einsparen, indem beispielsweise die Verluste im Motor reduziert

1 | Thadani und Allen 2023.



Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

Abbildung 38: Wertschöpfungsschritte der Leistungselektronik (in €/kW)

werden und so Material und Bauteilkomplexität reduziert werden können.

Kompetenzen in der Wertschöpfungskette

Basierend auf der Bauteilstruktur sowie der Wertschöpfung der Leistungselektronik ergeben sich die Hauptfertigungskompetenzen für die Leistungselektronik wie in Tabelle 5 abgebildet. Insbesondere für die elektronischen Bauteile der Leistungselektronik, wie die Halbleitermodule, ist die Wertschöpfungskette von hochgenauen Prozessen mit hohen Anforderungen an technische Sauberkeit und Reinheit der Umgebung geprägt. Daher haben Hersteller, die in diesen Markt einsteigen, hohe anfängliche Investments für die Fertigungsinfrastruktur. Gleichzeitig ist der Markt für Hersteller von Anlagentechnik begrenzt.

In den Peripheriekomponenten wie dem Kühlsystem, den Verbindungselementen oder dem Gehäuse sind klassische, verbreitete Prozesse wie das Schweißen, Fräsen, Oberflächenbeschichten oder Gussprozesse die Hauptfertigungskompetenzen.

Zentrale Erkenntnisse der Wertschöpfungsanalyse der Leistungselektronik

- SiC-Halbleiter ersetzen zunehmend Si-Bauelemente und senken Schaltverluste deutlich.
- Größte Kompetenzlücke: Halbleiterfertigung (SiC, GaN) – in BW nur in sehr begrenztem Umfang vorhanden
- Chancen bestehen in Modul-/Inverterfertigung, Test- und Validierungskompetenzen sowie thermischem Management

5.2.5 Brennstoffzellensysteme

Das Brennstoffzellensystem erfüllt innerhalb des FCET die Aufgabe der Energiewandlung von chemisch gebundener Energie in Form von Wasserstoff zu elektrischer Energie zur Versorgung des Antriebsstrangs. Im Folgenden werden die Bestandteile und Funktionen der Komponenten des brennstoffzellenbasierten Antriebsstrangs aufgeführt und erläutert.

In der Mobilität kommen vor allem Polymer-Elektrolyt-Membran(PEM)-Brennstoffzellen zum Einsatz, daher werden im Folgenden auch nur diese betrachtet.¹ Das Brennstoffzellensystem kann grundlegend in zwei Subsysteme unterteilt

1 | Kampker und Heimes 2024, S. 154.

Komponenten		Top-1-Kompetenz	Top-2-Kompetenz	Top-3-Kompetenz
Halbleitermodule	SiC-Halbleiter	Lithografie	Laserschneiden	Sintern
	DCB	Keramik-Kupfer-Bonding	Planarisierung	
Kondensatoren	Wickel/Stack	Vakuum-Metallisierung	Wickeln	Imprägnieren
	Gehäuse, Terminal	Schweißen	Löten	Verguss
Kühlsystem	Kühlsystem	CNC-Fräsen	Löten/Schweißen	
Microcontroller	PCB	Laminieren	Belichten/Ätzen	Bohren
Gehäuse	Gehäuse	Gießen	Umformen	Spanen
EMV/Filter	Induktivität	Wickeltechnik	Imprägnieren	Justieren
Sonstiges	Busbar	Beschichten	Biegen	
	Steckverbinder	Spritzgießen	Crimpen	

Tabelle 5: Übersicht der Hauptkompetenzen für die Fertigung der Leistungselektronik

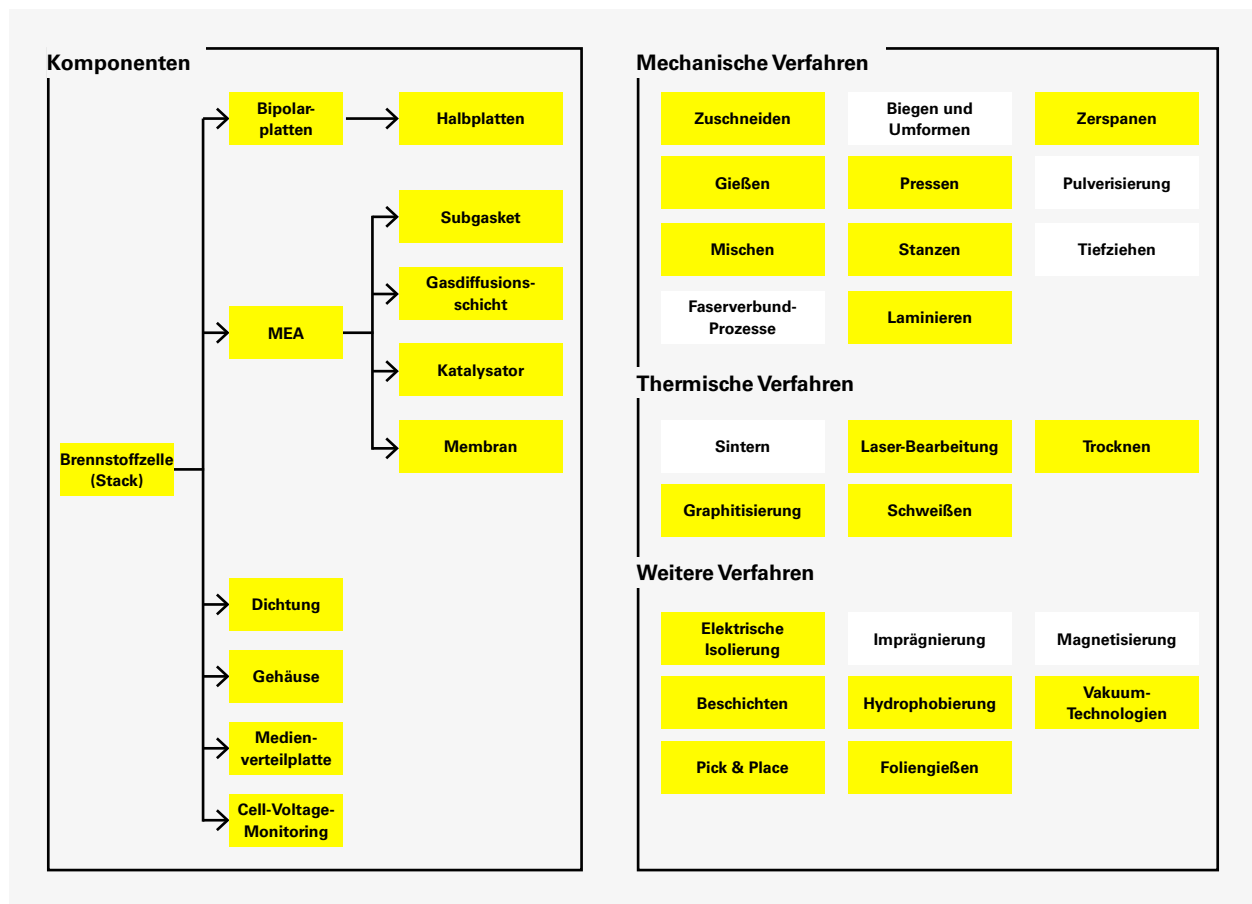
Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

werden: den Zellstapel (Englisch: Stack) und die Versorgungsaggregate (Englisch: Balance of Plant; BoP).¹ Der Brennstoffzellenstapel, als Herzstück des Systems, besteht wiederum dem Namen entsprechend aus einer Vielzahl einzelner Zellen, die gestapelt und miteinander verpresst werden (Abbildung 39). Eine einzelne Zelle besteht dabei aus der Membran-Elektrodeneinheit (Englisch: Membrane Electrode Assembly; MEA) und zwei Bipolarplattenhälften.²

Die Herstellung der Bipolarplatten erfolgt abhängig vom verwendeten Material über verschiedene mechanische, thermische und stoffliche Verfahren, dabei werden insbesondere graphitische und metallische Bipolarplatten für die Verwendung in der PEM-Brennstoffzelle betrachtet.³ Metallische Bi-

polarplatten werden typischerweise durch mechanische Umformprozesse wie Prägen, Stanzen und Tiefziehen gefertigt, wodurch die für die Gasführung notwendigen Strömungsfelder aus dem Metallblech herausgeformt werden. Anschließend werden zwei Halbplatten zu einer Bipolarplatte mit internen Kühlkanälen verschweißt. Bei alternativen Plattenmaterialien wie Graphit oder Verbundwerkstoffen kommen spanende Verfahren zum Einsatz, mit denen die Flussfelder präzise eingraviert werden. Das Stanzen dient sowohl bei Metall- als auch bei Dichtungs- und Trägermaterialien dem schnellen und exakten Ausschneiden der Konturen. Bei graphitbasierten Platten können zusätzlich thermische Verfahren notwendig werden, etwa die Graphitisierung oder das Sintern,

1 | Kampker und Heimes 2024, S. 156–157.
 2 | Zhang et al. 2023, S. 3–4.
 3 | HERMANN et al. 2005, S. 1298–1299.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 39: Komponenten und Produktionsverfahren Brennstoffzellen-Stack

um die benötigte elektrische Leitfähigkeit und Materialdichte zu erzeugen. Abschließend werden viele Bipolarplatten durch Beschichtungsverfahren veredelt, wodurch Korrosionsbeständigkeit und elektrische Kontaktqualität verbessert werden.¹

Die MEA besteht aus mehreren Schichten, die symmetrisch um die zentrale Protonenaustauschmembran (PEM) angeordnet sind.² Die PEM entsteht aus elektrisch isolierenden und protonenleitenden Polymeren, die durch Foliengießen zu einer Membran gefertigt und im Produktionsprozess häufig mithilfe thermischer Verfahren wie dem Trocknen oder durch Laserbearbeitung weiterverarbeitet werden. Die Laserbearbeitung ermöglicht es beispielsweise, präzise Konturen für die spätere Zellmontage auszuschneiden, alternativ können diese aber auch durch Stanzen erzielt werden. Bei der Herstellung der Katalysatorschichten, die beidseitig auf die Membran aufgetragen werden, kommen zunächst Misch- und Pulverisierungsprozesse zum Einsatz, um die katalytische Tinte aus Platinkatalysator, Kohlenstoffträger und ionomerem Bindemittel homogen herzustellen. Die eigentliche Applikation der Katalysatorschicht erfolgt über Beschichtungsverfahren, beispielsweise durch Rakeln, Druck- oder Sprühtechniken. Anschließend muss die applizierte Tintur durch thermische Prozesse stabilisiert werden, um die gewünschte Mikrostruktur der Katalysatorschicht auszubilden. Der Katalysator erfüllt dabei die Aufgabe, den reinen Wasserstoff auf der Anodenseite in Wasserstoff-Ionen (H^+) und Elektronen (e^-) aufzuspalten und auf der Kathodenseite den notwendigen Sauerstoff aus der Ansaugluft zu reduzieren ($O_2 \rightarrow 2O$) und die Oxidation zu Wasser (H_2O) zu ermöglichen.

Die beidseitig angebrachten Gasdiffusionslagen (GDL), die eine homogene Verteilung des Gas- und Luftstroms sicherstellen, entstehen häufig über Faserverbund- oder Vliesprozesse, bei denen kohlenstoffbasierte Fasern zu einem porösen Gewebe verbunden werden. Um die Wasserhaushaltsführung in der Zelle zu verbessern, werden diese anschließend hydrophobiert oder imprägniert, sodass Wasser abgewiesen und Gas leichter transportiert werden kann.³ Auch hier erfolgt das Zuschneiden der fertigen GDL meist über Stanzprozesse.

Abschließend wird zur Sicherstellung der Dichtigkeit der Zelle auf beiden Seiten des Verbunds eine Dichtung, das sogenannte

Subgasket (teilweise auch „Rahmen“ genannt), aufgebracht. Für diese Dichtungs- und Trägermaterialien sind insbesondere mechanische Verfahren wie das Stanzen und Zuschneiden relevant, da sie die exakte Geometrie für die Abdichtung der Medienkanäle gewährleisten.⁴ Häufig werden die Subgaskets zudem durch Beschichtungsverfahren mit haftenden Schichten oder Dichtmitteln versehen, die ihren mechanischen Halt während der Zellmontage verbessern.

In dieser Konstellation wird aufgrund der Vielzahl an Schichten häufig von der MEA-7 gesprochen. Das Zuführen der Reaktionsmedien, also Wasserstoff und Luft, auf beiden Seiten der MEA-7 erfolgt über die zuvor beschriebenen Strömungsfelder, die beidseitig in die Bipolarplatte eingebracht werden. Neben der Gasführung erfüllt die Bipolarplatte zudem die Aufgabe, die während der Reaktion freigesetzten Elektronen abzuleiten, um den als elektrische Antriebsenergie genutzten Strom bereitzustellen. Die Bipolarplatte erhält ihren Namen durch die Versorgung von zwei nebeneinanderliegenden Zellen als Bi-Pol, wodurch zwei aufeinanderfolgende Platten im Verbund eine gegenläufige Polarität aufweisen.

Zur Produktion des Stacks werden schließlich abwechselnd MEA und Bipolarplatten übereinandergestapelt und zwischen Medienverteilplatte und Endplatte innerhalb des Gehäuses verpresst.⁵ Der notwendige Kontaktdruck zwischen allen Komponenten wird über entsprechende Pressverfahren erzeugt. Bei der automatisierten Fertigung kommen zudem Pick-and-Place-Systeme zum Einsatz, welche die empfindlichen MEA-Schichten lagegenau platzieren. Metallische Endplatten oder Gehäuseteile werden häufig über Schweißverfahren gefügt, um eine dauerhaft dichte und robuste äußere Struktur des Brennstoffzellenstapels sicherzustellen.

Zum Betrieb des Stacks innerhalb eines Brennstoffzellensystems muss dieser in die Balance of Plant (BoP) integriert werden. Diese besteht aus den Subsystemen Luftbereitstellung, Wasserstoffversorgung, Kühlung, Abgassystem und Leistungselektronik und Steuerung. Das Luftbereitstellungssystem, auch Kathodenmodul genannt, besteht wiederum aus einem Luftfilter, dem Kompressor mit Ladeluftkühler, einem Luftbefeuchter sowie einem oder mehreren Wasserabscheidern (Abbildung 40).⁶

1 | Zhang et al. 2023, S. 6.

2 | Mo et al. 2023, S. 2–3.

3 | Mo et al. 2023, S. 10.

4 | Mo et al. 2023, S. 20.

5 | Zhang et al. 2023, S. 4.

6 | Kampker und Heimes 2024, S. 161.

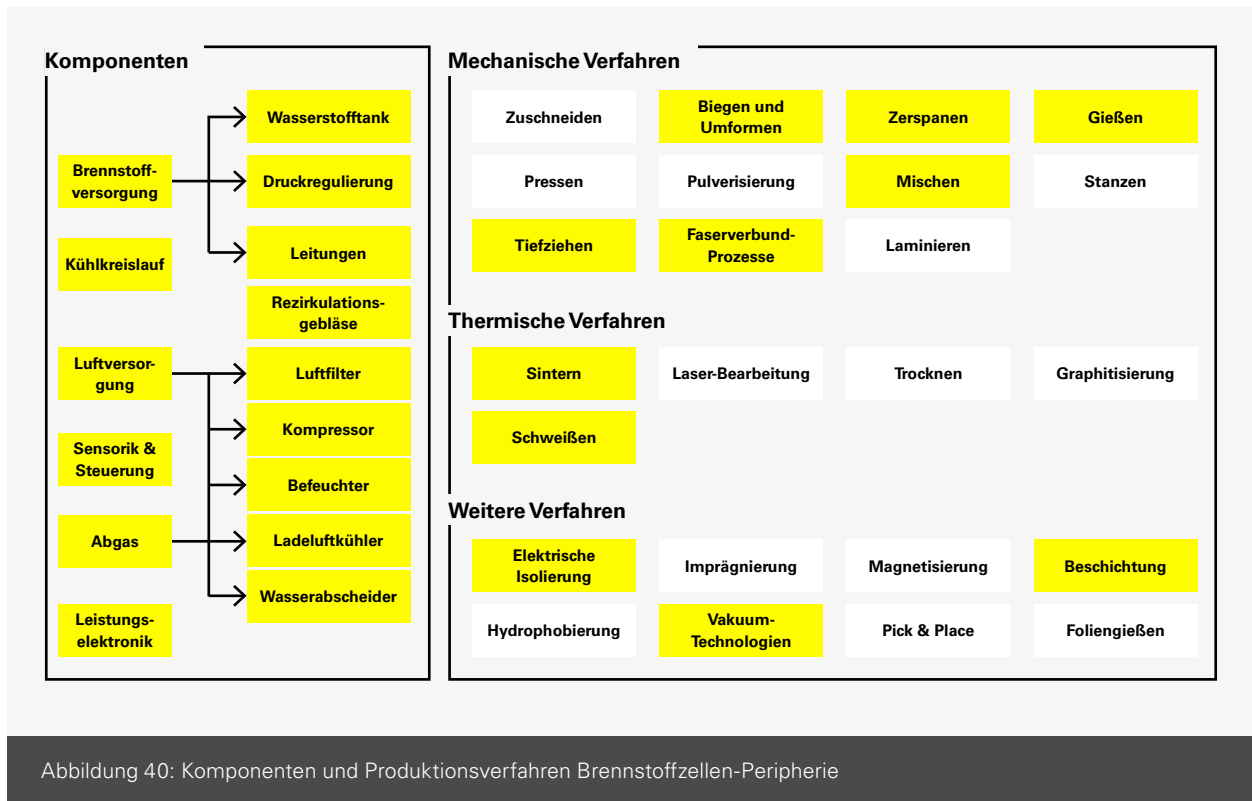


Abbildung 40: Komponenten und Produktionsverfahren Brennstoffzellen-Peripherie

Für die Fertigung dieser Komponenten kommen überwiegend mechanische Produktionsverfahren zum Einsatz. Gehäuse und Strömungskanäle werden durch Zuschneiden, Biegen und Umformen sowie Tiefziehen aus metallischen oder polymeren Werkstoffen hergestellt. Präzise Bauteile des Kompressors wie Verdichterräder entstehen durch Zerspanen. Filtermedien und Befeuchterstrukturen basieren häufig auf Faserverbund-Prozessen und Laminierverfahren. Luftbefeuchter und Wasserabscheider werden, je nach Anforderung, zusätzlich im Gießverfahren produziert oder mittels Schweißen und Laserbearbeitung gefügt.

Die Wasserstoffversorgung erfolgt aus dem Wasserstofftanksystem über einen Druckregler und entsprechende Wasserstoffleitungen und Ventile. Zusätzlich wird unverbrauchter Wasserstoff aus dem Stack über ein Rezirkulationsgebläse und vorgeschaltete Wasserabscheider innerhalb des Wasserstoffkreislaufs gehalten.¹ Die im Versorgungssystem eingesetzten Druckregler, Ventile und Leitungen werden aufgrund der ho-

hen Druckanforderungen vorwiegend durch Zerspanen hergestellt, um präzise Innengeometrien zu gewährleisten. Spezielle Druckkomponenten wie Ventilgehäuse oder Strukturbauteile können zudem über Pulverisierung und anschließendes Sintern gefertigt werden, um hohe Dichten und Festigkeiten sicherzustellen. Für Korrosionsschutz und Dichtheit werden die entsprechenden Bauteile häufig mit Imprägnierungen oder Beschichtungen versehen.

Der Kühlkreislauf des Brennstoffzellensystems wird unterteilt in eine direkte Stack-Kühlung oder Hochtemperaturkühlung und einen Peripherie- oder Niedertemperaturkreislauf. Grundsätzlich sind diese identisch aufgebaut, bestehend aus Kühlmittelpumpe, Radiator und Ausgleichsbehälter.² Für den Stack-Kreislauf wird zusätzlich ein Ionentauscher notwendig, um einen internen Kurzschluss durch zu hohe Leitfähigkeit des Kühlmittels zu verhindern. Radiatorlamellen werden üblicherweise über Tiefziehen und Biegen hergestellt, während Pumpengehäuse und Laufräder durch Gießen oder Zerspanen

1 | Han et al. 2022, S. 2.

2 | Führen et al. 2022, S. 45.

entstehen. Der Ionentauscher basiert auf funktionalisierten Harzen, die mittels Vakuum-Technologien getrocknet und über Hydrophobierungs- oder Imprägnierverfahren stabilisiert werden.

Im Abgasstrang befindet sich meist nur ein Wasserabscheider und der Schalldämpfer zur Gewährleistung geringer Geräuschemissionen.¹ Schalldämpfer und Abgasleitungen bestehen aus dünnwandigen Metallblechen, die im Wesentlichen durch Biegen, Tiefziehen und Laminieren verarbeitet und anschließend verschweißt werden. Anschlussteile werden überwiegend durch Zerspanen gefertigt. Wasserabscheidergehäuse werden je nach Werkstoffwahl im Gießverfahren oder über Press- und Umformprozesse hergestellt.

Das Wasserstofftankensystem brennstoffzellenelektrischer Fahrzeuge unterscheidet sich je nach Aggregatzustand des Wasserstoffs. Für gasförmigen Wasserstoff, der den heute üblichen Stand der Technik darstellt, kommen meist Hochdrucktanks des Typs 4 mit 350 bis 700 bar Speicherdruck, bestehend aus Kohlefaserverbundwerkstoffen mit Innenliner aus hochdichtem Polymer, zum Einsatz.² Diese werden gekoppelt mit temperatur- und druckgeregelten Sicherheitsventilen und Sensorik zur Überwachung der Gas-Zustände. Die Herstellung der Hochdrucktanks erfolgt über Faserverbund-Prozesse, insbesondere Filament-Winding. Der innere Polymerliner wird zuvor durch Tiefziehen oder Blasformen gefertigt. Anschließend wird der Verbundwerkstoff aufgebracht und unter thermischen Verfahren ausgehärtet. Sicherheitsventile und Sensorikgehäuse entstehen überwiegend durch Zerspanen oder Gießen.

Für flüssigen Wasserstoff werden hingegen vakuumisierte Edelstahl tanks verwendet, die aufgrund der tiefkalten Temperaturen des Wasserstoffs von -253°C auf speziellen Legierungen basieren.³ Zur Verwendung des Wasserstoffs muss dieser über einen Wärmetauscher erhitzt werden. Zusätzlich benötigen Flüssigwasserstofftanksysteme aufgrund des durch Wärmeeintrag unweigerlich entstehenden Boil-off Wasserstoffs, also einen geringen aber stetigen Anteil an verdampfendem und damit gasförmigem Wasserstoff, eine Abblasvorrichtung, um Überdruck im Tank zu vermeiden.⁴ Diese muss aus Sicherheitsgründen mit einem Katalysatorsystem ausgestattet werden, in dem der Wasserstoff zu Wasserdampf

umgesetzt wird, bevor dieser an die Umgebung abgegeben wird. Die kryogenen Edelstahl tanks entstehen durch präzise Schweißverfahren, um absolute Dichtheit sicherzustellen. Die äußere Vakuumisolierung wird durch spezielle Schichtungen aus Aluminium und Glasfaser ergänzt, welche die Wärmeleitung minimieren. Für das Katalysatorsystem werden metallische Trägerstrukturen durch Pulverisierung und Sintern erzeugt und anschließend mit aktiven Materialien beschichtet.

Wertschöpfung

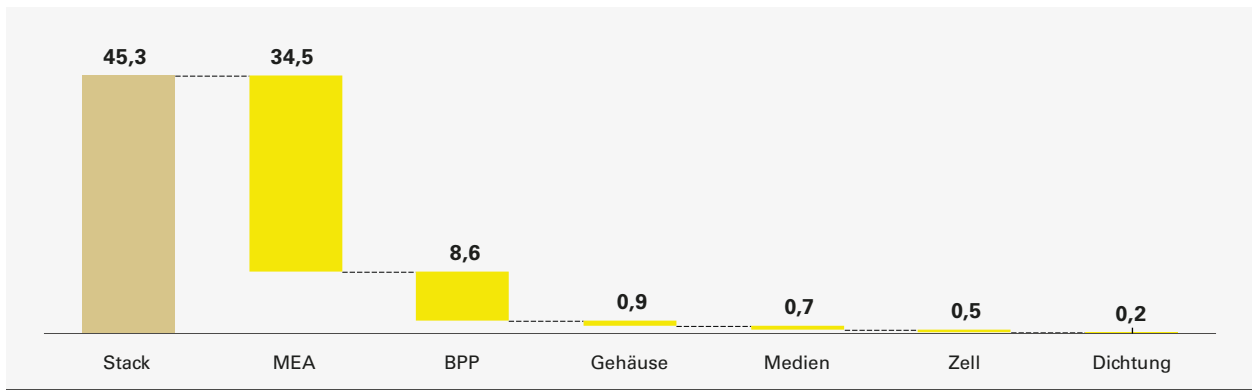
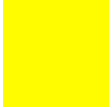
Die Wertschöpfungsstruktur in der Herstellung von Brennstoffzellensystemen unterscheidet sich grundlegend von klassischen elektrischen Antrieben, ist jedoch ebenso stark durch materialintensive Aktivkomponenten und komplexe Fertigungsprozesse geprägt. Während beim Elektromotor insbesondere die Aktivkomponenten Stator und Rotor die Kosten dominieren, zeigt sich in der PEM-Brennstoffzelle ein ähnlicher Schwerpunkt in den elektrochemisch aktiven Bereichen, also den Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) sowie den Bipolarplatten (BPP). Diese beiden Komponenten bestimmen, wie in Abbildung 41 dargestellt, den größten Anteil der Herstellkosten des Stacks, da sie sowohl material- als auch prozessseitig hochgradig anspruchsvoll sind. Ergänzend entstehen wesentliche Wertschöpfungsanteile in der Endmontage und in Prüftechnologien, da zahlreiche filigrane Zwischenstufen sensitiv gegenüber Fehlern und Verschmutzungen sind und damit einen hohen Automatisierungs- und Qualitätsaufwand bedingen.

1 | Kampker und Heimes 2024, S. 160–162.

2 | Magliano et al. 2024, S. 20.

3 | Aziz 2021, S. 18.

4 | Morales-Ospino et al. 2023, S. 6.

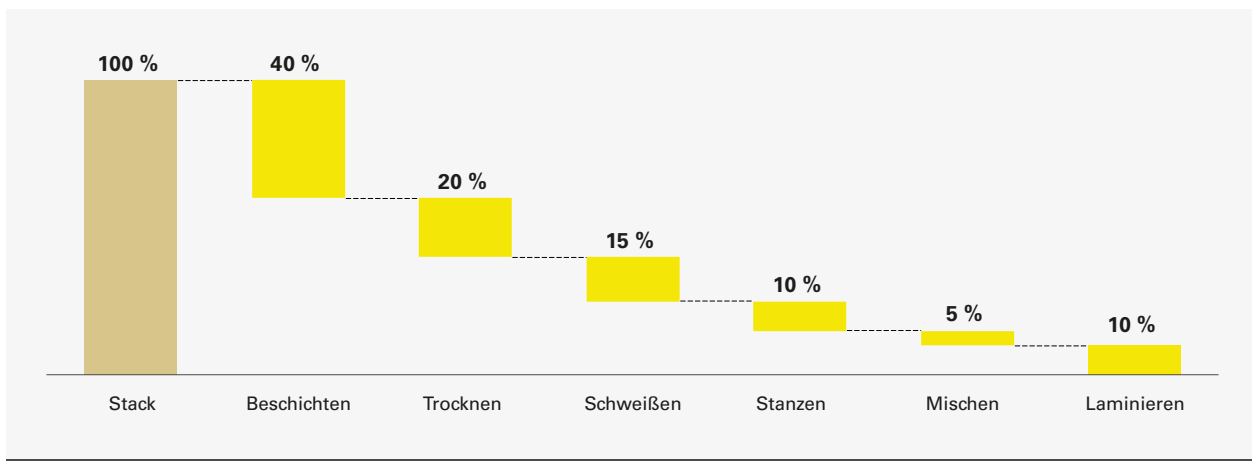


Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

Abbildung 41: Verteilung der Herstellkosten über die Subkomponenten eines Brennstoffzellenstacks [€/kW]

Die Wertschöpfung in der MEA-Fertigung ist insbesondere durch kostenintensive Funktionsmaterialien wie die katalytisch beschichteten Membranen sowie die Gasdiffusions-schichten geprägt. Die aufwendigen Prozessketten des Beschichtens, Trocknens und Laminierens erzeugen hohe Investitions- und Betriebskosten und führen zu einer starken Abhängigkeit von qualitätssensitiven Reinraumprozessen. Ähnlich wie im Elektromotor verschiebt sich die Wertschöpfung zunehmend von der Materialsynthese auf die Materialverarbeitung. Moderne katalytische Funktionsschichten sind dünner, homogener und auf bessere Platinausnutzung optimiert, wodurch neue Beschichtungs- und Trocknungstechnologien notwendig werden und die Kompetenzen in der Prozessführung zum zentralen Wettbewerbsvorteil werden.

Auch in der BPP-Fertigung zeigt sich dieser Trend. Obwohl metallische Bipolarplatten materialeitig kostengünstiger erscheinen, werden die Fertigungskosten durch komplexe Umform-, Stanz- und Fügeverfahren dominiert. Die Kombination aus sehr dünnen Ausgangsblechen und engen Toleranzfeldern im Kanaldesign führt zu hohen Anforderungen an Werkzeuge, Pressen und Beschichtungsprozesse. Die Wertschöpfungskette ist geprägt von umformenden Prozessen wie Stanzen, Biegen, Tiefziehen sowie thermischen Prozessen wie Schweißen und Beschichten, deren Prozessbeherrschung maßgeblich über Ausschuss, Lebensdauer und Stack-Performance entscheidet. Der Anteil der Produktionskompetenzen an der Wertschöpfung im Brennstoffzellenstack wird in Abbildung 42 zusammengefasst.



Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

Abbildung 42: Anteil der Wertschöpfung durch Produktionskompetenzen in einem Brennstoffzellenstack

In der Betrachtung der BoP zeigt sich eine ähnliche Struktur (Abbildung 43). Trotz teils vergleichsweise einfacher mechanischer Komponenten sind die Fertigungskosten durch eine Vielzahl funktionaler Anforderungen bestimmt. Luftversorgung, Wasserstoffspeicher, Ventile, Leitungen und Kühlsysteme basieren auf etablierten Grundmaterialien, jedoch auf anspruchsvollen Prozessketten. Komponenten wie Kompressor, Befeuchter oder Ladeluftkühler erfordern zerspanende, gießtechnische, membranbasierte und faserverbundtechnische Fertigungsschritte, wodurch die Wertschöpfung in der BoP stark in den Bereichen mechanische Fertigung, Dichtungs- und Fügetechnologie sowie Prüftechnik konzentriert ist. Insbesondere im Wasserstoffpfad führen extreme Druckanforderungen zu aufwendigen Zerspan-, Kalibrier- und Prüfprozessen, die den Fertigungsanteil im Verhältnis zu den Materialkosten erhöhen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Brennstoffzellenwertschöpfung, analog zum Elektromotor, durch eine Verschiebung der Kostentreiber hin zu prozessintensiven Fertigungsschritten gekennzeichnet ist. Während Materialkosten weiterhin einen erheblichen Anteil ausmachen, steigt der Wertschöpfungsanteil von Präzisionsfertigung, Oberflächen- und Membrantechnologien sowie komplexen Dicht- und Fügesystemen stetig an. Die Endmontage des Stacks und der BoP umfasst zahlreiche manuelle und automatisierte Schritte, darunter Funktionsprüfungen, Dichtigkeitsprüfungen und hochpräzises Schicht- und Bauteilhandling. Diese Aktivitäten sind kapital- und personalintensiv und wirken sich damit deutlich auf die Gesamtkosten aus.

Kostenpotenziale in der Produktion

Die größten Kostensenkungspotenziale in der Produktion von Brennstoffzellensystemen zur Integration in elektrifizierte Nutzfahrzeuge ergeben sich vor allem aus der konsequenten Industrialisierung, Skalierung und Prozessintegration entlang der wertschöpfungsintensiven Fertigungsstufen. Im Zentrum stehen dabei die MEA- und die BPP-Fertigung, da hier sowohl Material- als auch Prozesskosten gleichermaßen hoch ausfallen.

In der Produktion der MEA bieten reduzierte Edelmetallbelastungen der Katalysatorschicht durch verbesserte Beschichtungsprozesse (zum Beispiel graduierte Schichten) sowie alternative Katalysator- und Trägermaterialien signifikante Hebel, die Materialkosten der Produktion zu senken. Der wirtschaftliche Effekt dieser Maßnahmen hängt jedoch maßgeblich von stabil beherrschbaren Serienprozessen ab. Kurzfristige Kostensenkungspotenziale liegen hingegen auf der Prozessseite. Kontinuierliche Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsverfahren, verkürzte Trocknungszeiten, integrierte Inline-Qualitätsüberwachung sowie höhere Liniengeschwindigkeiten können Investitions-, Energie- und Ausschusskosten erheblich senken.

In der BPP-Fertigung lassen sich durch vereinfachte Kanalgeometrien, robustere Toleranzkonzepte und die Reduktion von Prozessschritten, etwa durch kombinierte Umform- und Fügeverfahren, sowohl Werkzeugkosten als auch Stillstandszeiten reduzieren.

Ergänzend entstehen wesentliche Kostenvorteile durch eine stärkere Automatisierung der Stackmontage, insbesondere

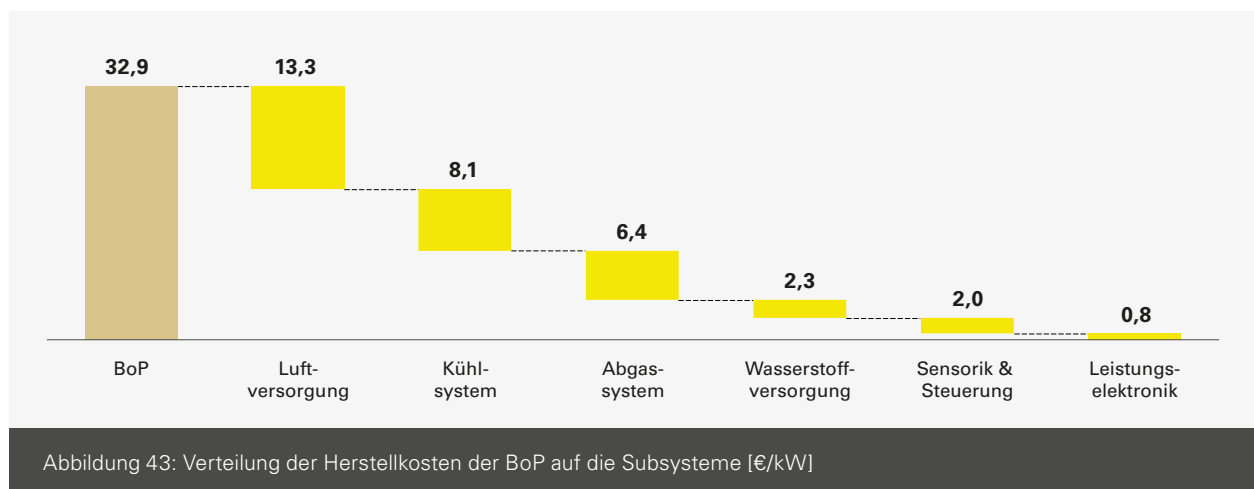


Abbildung 43: Verteilung der Herstellkosten der BoP auf die Subsysteme [€/kW]

durch standardisierte Dichtkonzepte, modulare Stackdesigns und eine Reduktion manueller Handhabungsschritte. Auch die Verlagerung von End-of-Line-Prüfungen hin zu prozessnaher Inline-Prüftechnik senkt Kosten, indem Nacharbeit und Ausschuss frühzeitig vermieden werden.

In der Balance of Plant liegen die Potenziale weniger in der Materialsubstitution als in der Funktionsintegration, der Variantenreduktion und der Nutzung automobiler Großserientechnologien, etwa bei Verdichtern, Ventilen und Kühlkomponenten, wo heute aufgrund der aufwendigen Zertifizierung oft auf wenige spezialisierte Komponentenhersteller zurückgegriffen wird.

Insgesamt zeigt sich, dass Kostensenkungen weniger durch einzelne technologische Durchbrüche, sondern vielmehr durch systematische Lernkurveneffekte, höhere Stückzahlen und eine zunehmende Reife der Produktionsprozesse realisiert werden können, wodurch sich die Brennstoffzellenproduktion schrittweise von einer durch manuelle Fertigungsprozesse geprägten Produktion hin zu einer wettbewerbsfähigen Serienproduktion entwickeln kann.

Kompetenzen in der Produktion von Brennstoffzellensystemen

Die für die Herstellung des Brennstoffzellenstacks und der BoP erforderlichen Kernkompetenzen sind vielseitig und teilweise spezifisch auf elektrochemische und fluidtechnische Anforderungen ausgerichtet. Für eine kostengünstige Produktion von Brennstoffzellensystemen sind sowohl klassische umformende und spanende Verfahren als auch hochspezialisierte Dünnschicht-, Membran-, Dichtungs- und Beschichtungsprozesse essenziell.

In der MEA-Fertigung liegen die zentralen Kompetenzen in den Bereichen Beschichtungs- und Trocknungstechnologien, Membranverarbeitung, Laminierprozesse und Reinraumtechnik. Ein besonderer Komplexitätstreiber ist das Handling extrem empfindlicher Membranmaterialien, deren homogene Beschichtung und Trocknung den Wirkungsgrad und die Lebensdauer des Stacks maßgeblich beeinflussen. Kompetenzen im Bereich katalytischer Materialabscheidung sowie der Mikro- und Makrostrukturierung der Funktionsschichten werden zunehmend zu strategischen Alleinstellungsmerkmalen, da sie Effizienz und Platinbedarf signifikant bestimmen.

Die BPP-Fertigung setzt hingegen Schwerpunkte in den Bereichen Stanzen, Tiefziehen, Präzisionsumformung sowie Schweiß- und Beschichtungsprozesse. Die Fähigkeit, hochpräzise Kanalstrukturen in dünnwandige Metallfolien einzubringen und diese anschließend gas- und korrosionsdicht zu verschweißen, stellt hohe Anforderungen an Werkzeugtechnologie, Prozessüberwachung und Qualitätsmanagement. Beschichtungsprozesse, beispielsweise zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit, erweitern die notwendige Kompetenzbasis um Bereiche der Werkstoffkunde und Oberflächenchemie.

Für die BoP ergeben sich weitere Kompetenzfelder. In der Luftversorgung liegen diese insbesondere in Lagerungstechnik, Zerspanung, Gussverfahren sowie in Dichtungs- und Klebertechnologien, wie sie etwa bei Kompressor, Ladeluftkühler oder Luftbefeuchter gefordert sind. Im Kühl- und Wasserstoffpfad dominieren Druckguss, Fräsen, Kalibrieren sowie Prüftechnik, insbesondere für Ventile und Leitungen. Das Abgasystem erfordert Kompetenzen in Biege-, Schweiß- und Membranprozessen. Komponenten wie Wasserabscheider oder Schalldämpfer stellen hohe Anforderungen an Umformtechnik, Membranherstellung und Akustikprüfung.

Komponenten		Top-1-Kompetenz	Top-2-Kompetenz	Top-3-Kompetenz
MEA	Membran-Elektroden-Einheit	Beschichten	Trocknen	Stanzen
	Membran	Dünnschichtextrusion	Werkstoffkunde	Reinraumprozesstechnik
	Katalysatorbeschichtung	Beschichten	Trocknen	Laminieren
	Gasdiffusionsschicht	Kohlenstoffaserverarbeitung	Mikroporöse Schichtaufbringung	Stanzen
	Subgasket	Stanzen	Präzisionsbeschichtung	Werkstoffkunde
BPP	Bipolarplatte	Stanzen	Schweißen	Beschichten
	Halbplatten	Stanzen	Schweißen	Beschichten
Luftversorgung	Luftversorgung	Lagerungstechnik	Fräsen	Druckguss
	Kompressor	Lagerungstechnik	Fräsen	Gießen
	Luftfilter	Zuschneiden	Verkleben	Kunststoff Druckguss
	Befeuchter	Membrantechnologien	Dichtungs- und Klebprozesse	Leckageprüfung
	Ladeluftkühler	Lamellenfertigung	Aluminiumlöten	Kunststoff Druckguss
Kühlsystem	Kühlsystem	Druckguss	Fräsen	Dichtungsprozesse
	Kühlmittelpumpe	Druckguss	Lagerungstechnik	Dichtigkeitsprüfung
	Radiator	Lammellenfertigung	Hart- und Weichlöten	Dichtungstechnologie
	Ionentauscher	Reinraumfertigung	Druckguss	Qualitätsprüfung
	Ventile	Fräsen	Kalibrieren	Qualitätskontrolle
Abgassystem	Abgassystem	Biegen	Schweißen	Dichtungsprozesse
	Wasserabscheider	Membrantechnologie	Spritzguss	Dichtungs- und Klebprozesse
	Schalldämpfer	Biegen	Schweißen	Akustikprüfungen

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Tabelle 6: Zusammenfassung der Kernkompetenzen je Komponente

In Summe zeigt die Wertschöpfungskette des Brennstoffzellensystems eine erhebliche Komplexität, da unterschiedliche Kompetenzen aus Elektrotechnik, Maschinenbau, Chemie, Werkstoffwissenschaft und Membrantechnologie ineinandergreifen. Dabei ergeben sich die höchsten Wertschöpfungsbeiträge aus prozessintensiven Fertigungsschritten, anspruchsvoller Prüftechnik sowie dem hochsensiblen Handling funktionskritischer Komponenten.

Zentrale Erkenntnisse der Wertschöpfungsanalyse der Brennstoffzelle

- 95% der Herstellungskosten des Brennstoffzellen-Stacks entfallen auf MEA und BPP.
- Balance-of-Plant: Kompressoren, Ventile, Wärmetauscher bauen auf starke Maschinenbau-Kompetenzen in BW auf.
- Kostensenkung entsteht weniger durch Technologiedurchbrüche als durch Lernkurveneffekte, höhere Stückzahlen und Prozessreife.

5.2.6 Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Der wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotor (H₂-ICET) stellt innerhalb der alternativen Antriebstechnologien einen Sonderfall dar, da er das bewährte Grundprinzip des hubkolbenbasierten Verbrennungsmotors mit einem kohlenstofffreien Energieträger kombiniert. Thermodynamisch basiert der H₂-ICET auf dem Otto-Prozess mit Fremdzündung, während er konstruktiv in weiten Teilen auf der mechanischen Architektur schwerer Dieselmotoren aufbaut. Insbesondere das Motorgrundaggregat mit Zylinderblock, Kurbelgehäuse und Kurbeltrieb sowie große Teile des Ventiltriebs können aus bestehenden Heavy-Duty-Dieselplattformen abgeleitet werden. Während bei der Wasserstoffverbrennung keine CO₂- oder kraftstoffbedingten Kohlenwasserstoffemissionen auftreten, entstehen infolge hoher Verbrennungstemperaturen NO₂-Emissionen, sodass weiterhin Abgasnachbehandlungssysteme erforderlich sind.¹

Stücklisten und Systemstruktur

Auf Systemebene lässt sich der H₂-ICET-Antriebsstrang in drei Gruppen von Komponenten gliedern, die in Abbildung 44 detailliert dargestellt sind. Die erste Gruppe umfasst weitgehend unveränderte Komponenten des konventionellen Dieselantriebsstrangs. Dazu zählen das Motorgrundaggregat mit

Zylinderblock und Kurbelgehäuse, der Kurbeltrieb, das Grundlayout des Ventiltriebs sowie das mechanische Kraftübertragungssystem mit Kupplung, Getriebe, Kardanwelle und Antriebsachsen. In diesen Bereichen entspricht die Komponentenstruktur in hohem Maße der eines Euro-VI-Dieselantriebsstrangs, wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Dadurch können bestehende Produktionsanlagen und Lieferketten grundsätzlich weiter genutzt werden. Die zweite Gruppe beinhaltet modifizierte Motorenkomponenten, die an die spezifischen Anforderungen der Wasserstoffverbrennung angepasst werden müssen. Hierzu zählen insbesondere der Zylinderkopf mit angepasster Brennraumgeometrie, Ventile und Ventilsitzringe, Zündsysteme sowie je nach Konzept das Einspritzsystem. Wasserstoffspezifische Anforderungen ergeben sich aus der hohen Flammgeschwindigkeit, der geringen Zündenergie und den besonderen Anforderungen an Dichtheit und Materialbeständigkeit. In vielen seriennahen Anwendungen wird eine Saugrohreinspritzung eingesetzt, da diese vergleichsweise geringe Anforderungen an Einspritzdruck und Dichtsysteme stellt.² Für direkteinspritzende Konzepte sind zudem Hochdruckpumpen und Injektoren erforderlich, die Einspritzdrücke von mehreren hundert bar bereitstellen können. Die Unterschiede zum Dieselmotor liegen somit weniger in der mechanischen Grundstruktur als vielmehr im Brennverfahren, der Medienführung, der Sensorik sowie in der werkstoff- und dichtungstechnischen Auslegung.³

1 | van Basshuysen und Schäfer 2017.

2 | Klepatz 2023, S. 4–6.

3 | Köllner 2025.

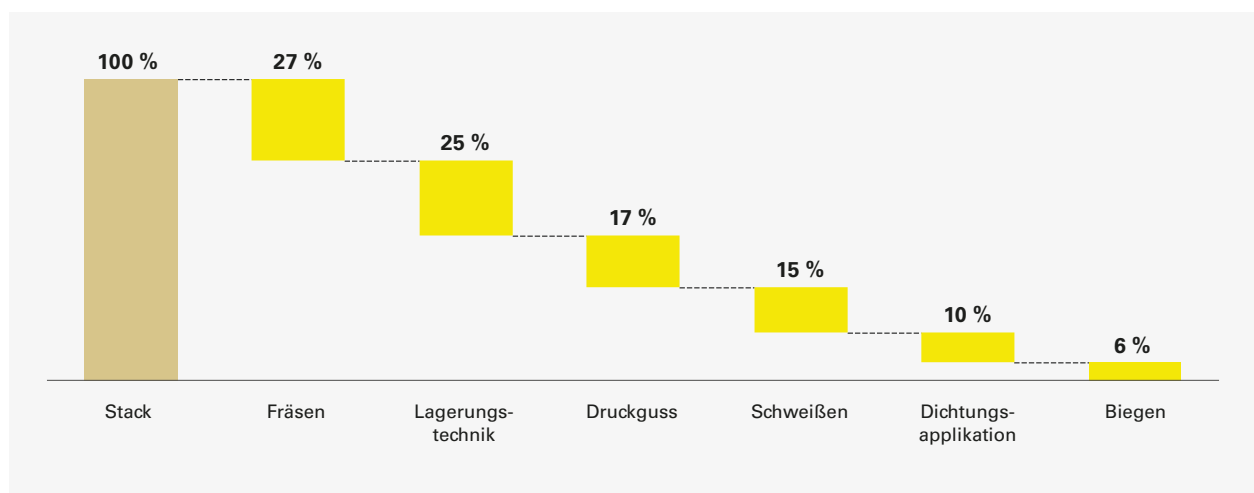


Abbildung 44: Anteil der Wertschöpfung durch Produktionskompetenzen in der Herstellung der BoP

Quelle: eigene Abschätzung PEM, 2026

Die dritte Komponentengruppe umfasst das wasserstoffspezifische Speichersystem und die zugehörige Peripherie. Abhängig vom Aggregatzustand des Wasserstoffs kommen entweder gasförmige Hochdruckspeicher, typischerweise 350-bar-Systeme mit polymerem Liner und faserverstärkter Umwicklung, oder vakuumisolierte Flüssigwasserstofftanks mit kryogener Peripherie zum Einsatz.¹ Die grundsätzliche Speicher- und Peripheriearchitektur weist dabei deutliche Parallelen zu brennstoffzellenelektrischen Antriebssystemen auf, unterscheidet sich jedoch in der Auslegung der Betriebsdrücke, Lastprofile und sicherheitsrelevanten Systemfunktionen. Entsprechend werden vergleichbare, jedoch nicht notwendigerweise identisch spezifizierte Komponenten wie Ventile, Druckregelstufen, Leitungen, Sicherheitsventile und Sensorik zur

Überwachung von Druck, Temperatur und Leckage eingesetzt. Ergänzend können je nach Systemauslegung Rezirkulations- und Entlastungspfade vorgesehen sein. Bei direkteinspritzenden H₂-Motoren tritt zusätzlich eine motorseitige Hochdruckförderung in den Vordergrund, die gegenüber Saugrohrkonzepten erhöhte Anforderungen an Dichtheit, Werkstoffbeständigkeit und die Auslegung der Förderaggregate stellt.² Auf Basis der in Kapitel 5.1 verwendeten Systemkostenstruktur ergibt sich bei einem H₂-ICET-Fahrzeug mit Herstellungskosten von ungefähr 195.000 € folgende Aufteilung der Herstellungskosten: Rund 25 % entfallen auf Motor und Getriebe, 29% auf das Wasserstoffspeichersystem, 15% auf die wasserstoffspezifische Peripherie zum Betrieb des Motors, 15% auf die Ausstattung der Kabine, 7% auf das

1 | Kampker et al. 2024a.
2 | Sari et al. 2024.

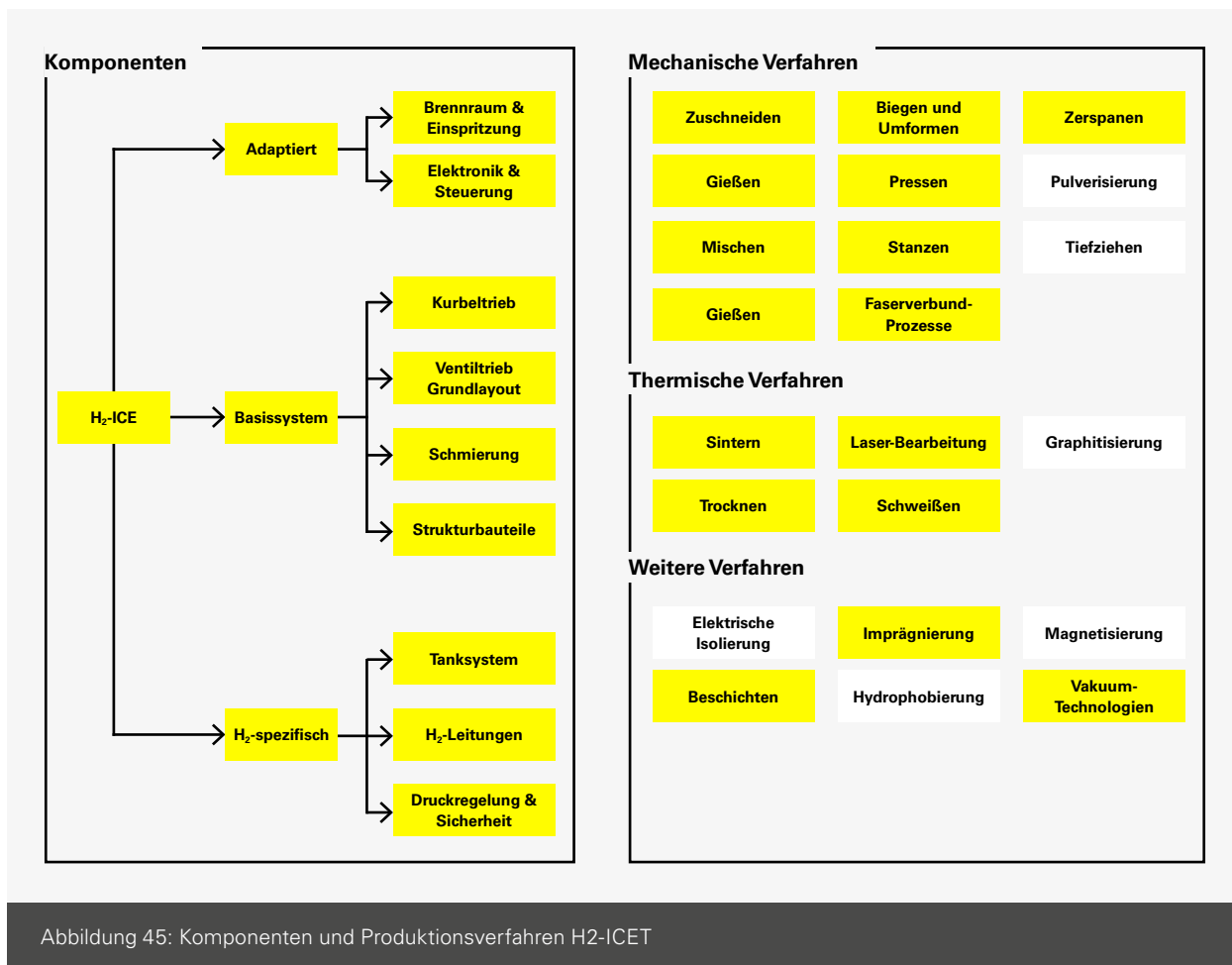


Abbildung 45: Komponenten und Produktionsverfahren H2-ICET

Fahrwerk und 9% auf weitere Systemkomponenten. Die entsprechende Kostenverteilung ist in Abbildung 44 dargestellt. Im Vergleich zum Dieselantrieb bleibt damit ein wesentlicher Anteil der wertschöpfungsintensiven Motor- und Getriebe-komponenten erhalten, während neue Wertschöpfungsanteile im Bereich der Wasserstofftanks und -peripherie entstehen, die stark mit der FCET-Technologie verknüpft sind.

Wertschöpfungs- und Kostenstruktur

Die beschriebene Komponentenstruktur spiegelt sich in der Wertschöpfungsstruktur des H₂-ICET wider, wie Abbildung

45 verdeutlicht. Ein erheblicher Teil der Wertschöpfung verbleibt in den klassischen Gießerei- und Zerspanprozessen des Motorgrundaggregats. Zylinderblock, Zylinderkopf, Pleuelwelle, Pleuel und Gehäusebauteile erfordern weiterhin komplexe Guss- und Bearbeitungsprozesse mit hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität und Dauerfestigkeit, wie sie auch beim Dieselerbrennungsmotor vorliegen.¹ Diese Wertschöpfungsanteile sind in Baden-Württemberg stark verankert und bilden einen wichtigen Anknüpfungspunkt für die Transformation bestehender Produktionskapazitäten. In der Abbildung 46 sind die Herstellungskosten und die wertschöpfenden Produktionsverfahren des H₂-ICET aufgeführt.

1 | van Basshuysen und Schäfer 2017.

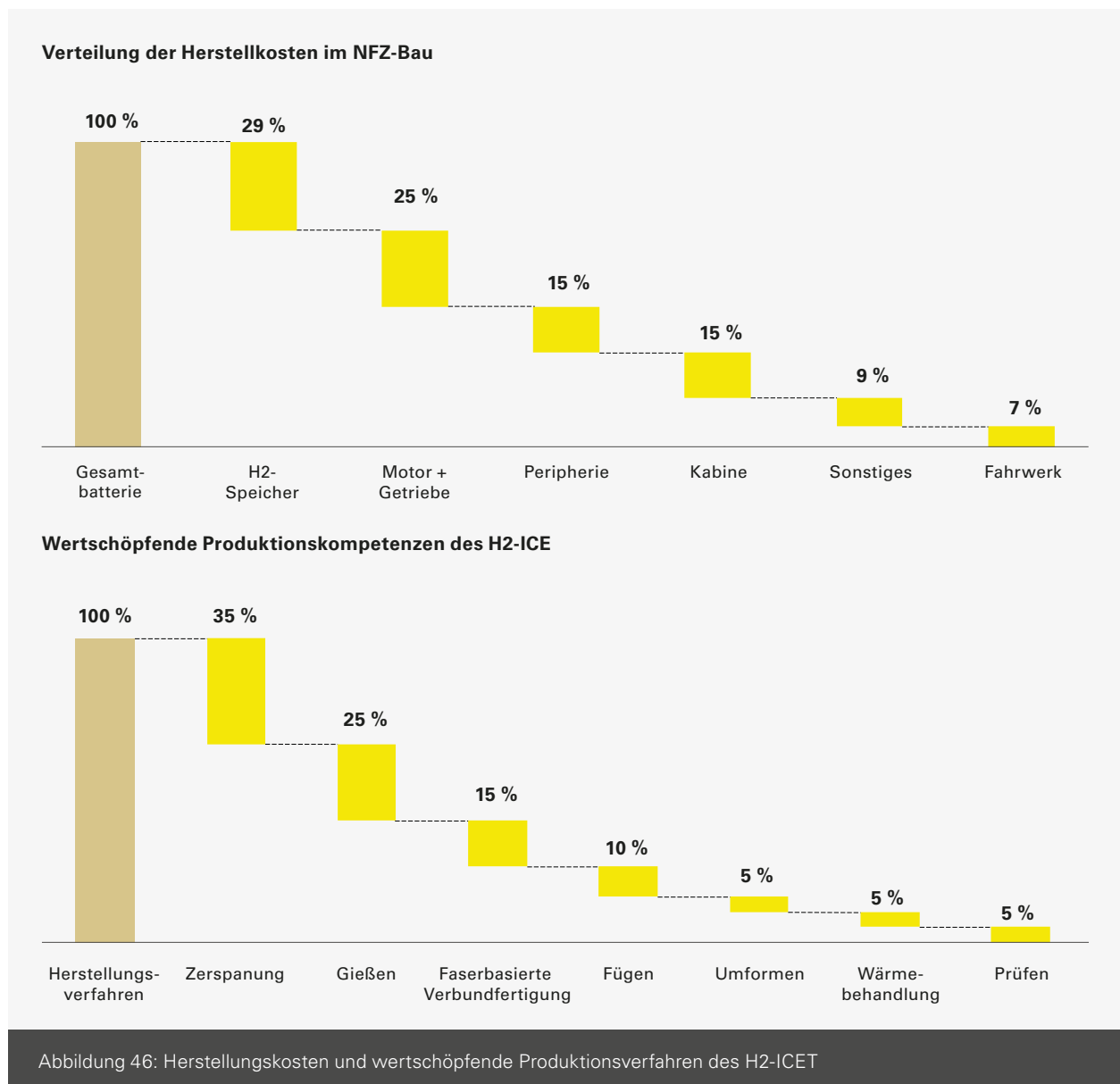


Abbildung 46: Herstellungskosten und wertschöpfende Produktionsverfahren des H₂-ICET

Die modifizierten Motorenkomponenten verschieben die Wertschöpfung innerhalb des Motorsegments. Anpassungen an Brennraum, Zylinderkopf, Ventiltrieb, Einspritz- oder Einblastsystem sowie Zündkomponenten führen zu zusätzlichen Entwicklungs- und Industrialisierungsaufwänden, die sich in höherem Engineering-Anteil, komplexerer Prozesstechnik und erhöhten Prüfanforderungen niederschlagen. Die Fertigung dieser Komponenten nutzt zwar weitgehend bestehende Verfahren wie Zerspanung, Wärmebehandlung und Fügen, erfordert aber eine stärkere werkstofftechnische Auslegung hinsichtlich Wasserstoffversprödung, Permeation und Dichtigkeit.¹ Besonders deutlich zeigt sich der Wertschöpfungszuwachs im Bereich des Wasserstoffspeichersystems und der Peripherie. Die Herstellung von Typ-IV-Hochdrucktanks aus Kohlefaserverbundwerkstoffen ist durch faserbasierte Wickelprozesse, präzise Aushärtung und umfangreiche zerstörungsfreie Prüfung geprägt.² Dazu kommen metallische Armaturen, Ventile, Sensoren und Druckregelstufen, die hochdrucktaugliche Zerspan-, Füge- und Oberflächenprozesse erfordern. Bei Flüssigwasserstoffsystemen verschiebt sich die Wertschöpfung hin zu kryogenen Edeltanksystemen mit komplexer Isolationsstruktur, integrierten Wärmetauschern und Boil-off-Management, ergänzt um Katalysatorsysteme zur sicheren Umsetzung des abgeblasenen Wasserstoffs.

In Summe entsteht im H₂-ICET-Antriebsstrang eine Wertschöpfungsstruktur, die einerseits zentrale Elemente der konventionellen Motorfertigung erhält und transformiert, andererseits neue, wasserstoffspezifische Wertschöpfungsfelder erschließt. Im Vergleich zu brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen ist der Anteil kostenintensiver Brennstoffzellenkomponenten geringer, während der Anteil des mechanischen Motorgrundaggregats höher bleibt. Tanksysteme und Teile der Peripherie weisen hingegen deutliche Überschneidungen auf.

Notwendige Fertigungskompetenzen

Aus der beschriebenen Struktur lassen sich drei zentrale Kompetenzcluster ableiten, die für die Fertigung von H₂-Verbrennungsmotoren und deren Peripherie maßgeblich sind.

Erstens bleibt das Kompetenzfeld der klassischen Verbrennungsmotorfertigung von zentraler Bedeutung. Dazu gehören Gießereikompetenzen für Zylinderblock, Kopf und Gehäuse-

komponenten, Zerspanungskompetenzen für hochbelastete Funktionsflächen, Wärmebehandlung von Kurbelwellen, Nockenwellen und Ventiltrieben sowie Montage- und Prüfkompetenzen für komplette Motorenaggregate. Ergänzend sind Applikations- und Kalibrierkompetenzen notwendig, um Verbrennung, Emissionen und Betriebsstrategien unter Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff zu optimieren. Diese Kompetenzen sind in Baden-Württemberg traditionell stark ausgeprägt und können für H₂-Anwendungen weitergenutzt werden.

Zweitens sind wasserstoffspezifische Kompetenzen erforderlich, die über den klassischen Motorenbau hinausgehen. Dazu zählen Werkstoff- und Dichtungskompetenzen im Umgang mit Wasserstoff, insbesondere hinsichtlich Permeation, Versprödung und Langzeitbeständigkeit, die Auslegung und Fertigung von Hochdruckkomponenten wie Pumpen, Ventilen und Leitungen, Prüf- und Leckagekontrollverfahren für Wasserstoffsysteme sowie Sicherheitskonzepte für den Umgang mit brennbaren Gasen unter hohem Druck. Hier überschneiden sich die Anforderungen teilweise mit denen der FCET-Peripherie und der Wasserstoffinfrastruktur, sodass sich Synergien in der Nutzung von Prüfständen, Testmethoden und Zulassungsverfahren ergeben.

Drittens gewinnt die Fertigung von Wasserstoffspeichersystemen als eigenständiges Kompetenzfeld an Bedeutung. Für gasförmige Systeme umfasst dies die Auslegung und Produktion von Faserverbundtanks (Liner-Herstellung, Wickelprozesse, Aushärtung, zerstörungsfreie Prüfung), für flüssige Systeme die Tankfertigung mit kryogenen Werkstoffen, Vakuumisoliationsprozessen und integrierten Wärmetauschern. Ergänzend ist Systemkompetenz in der Integration des Tanksystems in das Fahrzeug erforderlich, einschließlich Halterungskonzepten, Crashesicherheit und Leitungsführung. Diese Kompetenzen sind im regionalen Wertschöpfungssystem bislang nur in Ansätzen vorhanden und werden im Rahmen der späteren Gap-Analyse als eigenständiges Entwicklungsfeld adressiert.

Insgesamt zeigt der H₂-Verbrennungsmotor, dass die Antriebswende nicht zwingend einen vollständigen Bruch mit der bestehenden Verbrennerwertschöpfung bedeutet, sondern dass ein Teil der etablierten Prozesse und Kompetenzen in

1 | Beste 2022.

2 | Kampker und Heimes 2024.

modifizierter Form weitergenutzt werden kann. Gleichzeitig wird deutlich, dass insbesondere wasserstoffspezifische Speicher- und Sicherheitstechnologien neue Kompetenzfelder eröffnen, in denen Baden-Württemberg, auch aufgrund der Synergien mit der Brennstoffzellentechnologie, gezielt Wertschöpfungspotenziale erschließen kann. Diese Doppelrolle des H₂-ICET als Transformations- und Ergänzungstechnologie ist in der nachfolgenden Kompetenz-Gap-Analyse von besonderer Relevanz.

Zentrale Erkenntnisse der Wertschöpfungsanalyse des Wasserstoffverbrenners

- Rund 25 % der Herstellungskosten entfallen auf Motor/Getriebe, 29 % auf das Wasserstoffspeichersystem, 15 % auf H₂-Peripherie.
- Klassische Verbrenner-Kompetenzen (Gießen, Zerspanung, Montage) bleiben nutzbar, ergänzt um neue Anforderungen an Werkstoffbeständigkeit, Dichtheit und Hochdruck-Handling.
- Synergien mit FCET-Technologie bei Tanksystemen und Peripherie ermöglichen geteilte Investitionen.

5.3 Kompetenz-Mapping

In diesem Abschnitt werden Kompetenzträger in der Wissenschaft und Forschung identifiziert, die bereits Kompetenzen aufweisen, um die aufkommenden Entwicklungs- und Produktionsbedarfe abzudecken. Kooperationen zwischen diesen und ähnlichen Unternehmen und Forschungseinrichtungen stärken die technische Kompetenz in Baden-Württemberg und ermöglichen einen wirtschaftlich günstigen Wechsel zu alternativen Antrieben.

Traktionsbatterie

Für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Fertigung von Traktionsbatterien ist nicht allein die Produktionskapazität ausschlaggebend, sondern vor allem der gesicherte Zugriff auf

prozesskritische Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette. In Deutschland bestehen dafür bereits tragfähige Anknüpfungspunkte: einerseits durch Unternehmen mit eigener Batterie- beziehungsweise Zellerfahrung, andererseits durch spezialisierte Zulieferer und Anlagenbauer, die einzelne Schlüsselprozesse beherrschen und damit als Partner für einen industriellen Hochlauf geeignet sind.

Als wichtiger Ankerakteur in der Batteriezellfertigung ist insbesondere die VARTA AG zu nennen. Durch die eigene Batterieproduktion verfügt VARTA über relevante Produktions- und Prozesskompetenzen, die eine belastbare Ausgangsbasis für den Transfer in Richtung Traktionsbatterien bilden können.¹ Um die spezifischen Anforderungen des Automotive-Kontexts, wie Skalierung, Prozessstabilität, engere Qualitätsfenster und Rückverfolgbarkeit zügig abzudecken, bietet sich eine gezielte Ergänzung dieser Kompetenzen über strategische Partnerschaften an.

Die erforderlichen Kompetenzen wurden in Kapitel 5.2.2 eingeführt und lassen sich als durchgängige Prozesskette beschreiben: Mischen und Beschichten als Basis der Elektrodenfertigung, anschließendes Trocknen, Dosieren und Kleben in Montage- und Applikationsschritten, Schweißen als zentrale Fügetechnologie sowie Reinraumumgebung und Prüftechnik als querschnittliche Voraussetzungen für reproduzierbare Qualität. Entscheidend ist dabei nicht nur das Vorhandensein einzelner Anlagen, sondern die robuste Beherrschung der Prozesse inklusive Automatisierung, Prozessfensterführung und Inline- sowie End-of-Line-Qualifizierung. Mehrere Unternehmen decken diese Bausteine bereits in Teilbereichen ab und ermöglichen damit eine modulare Kompetenzentwicklung über Kooperationen.

Auf Prozessebene adressieren die Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG und DOPAG als Teil der Hilger u. Kern GmbH insbesondere das Mischen und damit einen zentralen Hebel für reproduzierbare Elektrodenqualität.^{2,3} Unternehmen wie die RAMPF Machine Systems GmbH & Co. KG bringen Kompetenzen in Prozessautomatisierung, Dosiertechnik sowie Kleb- und Dichtungssystemen ein und sind damit vor allem für Montage- und Applikationsprozesse relevant, in denen Prozessstabilität und Taktzeit maßgeblich sind.⁴

1 | VARTA startet modernste Heimspeicher-Produktion in Deutschland 2024.

2 | Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG.

3 | Hilger u. Kern GmbH.

4 | RAMPF Holding GmbH & Co. KG.

Ergänzend stärkt bdtronic dieses Feld durch Dosieranlagen und Industrieöfen und adressiert damit sowohl Applikations- als auch thermische Prozessschritte in der Batterieproduktion.¹ Für qualitätskritische Füge-technologien erweitern die TRUMPF GmbH und Herrmann Ultraschall Schweißen GmbH das Partnerportfolio in Richtung präziser, skalierbarer Verbindungstechnologien.^{2,3} Querschnittlich könnten die Carl Zeiss AG und Freudenberg SE dazu beitragen,

Qualitätssicherung, Prozessüberwachung und Zuverlässigkeit auf Komponenten-, Modul- und Systemebene abzusichern.^{4,5} Für die infrastrukturelle Voraussetzung stabiler Prozesse, insbesondere Rein- und Trockenraumumgebungen, sind Exyte GmbH und SCHILLING ENGINEERING GmbH als Kompetensträger für Fabrikplanung und Reinraumaufbau relevant.^{6,7}

Neben industriellen Akteuren leisten Forschungsinstitutionen einen wesentlichen Beitrag zum gezielten Kompetenzaufbau und zum Transfer in die industrielle Praxis. In Partnerschaften lassen sich dort entwickelte Verfahren, Prozessverständnis und Prüfroutinen in die Wirtschaft überführen und für den Serienhochlauf nutzbar machen. Die betrachteten Institutionen decken dabei die Wertschöpfungskette von Material- und Prozessgrundlagen über die Zellfertigung bis hin zu Prüfung und Skalierungsfragen ab. Das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) vereint Pilotinfrastruktur, Materialforschung und Batterietests und ist damit als integrierter Partner für prozess- und produktseitige Fragestellungen besonders anschlussfähig.⁸ Das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) erforscht Materialien und Verfahren der Zellfertigung und unterstützt damit insbesondere die Weiterentwicklung und Absicherung vorgelagerter Prozessschritte.⁹ Das Fraunhofer FFB legt den Schwerpunkt auf industriennahe Skalierung und Digitalisierung der Batterie-zellfertigung und ergänzt damit die Perspektive um Industrialisierung, Daten-/Prozessintegration und Ramp-up.¹⁰

E-Motor

Der erfolgreiche Einstieg in die E-Motor-Produktion für schwere Nutzfahrzeuge erfordert den systematischen Zugriff auf spezialisierte Fertigungskompetenzen entlang der Wertschöpfungskette. Die Herstellung elektrischer Traktionsmotoren unterscheidet sich fundamental von der konventionellen Verbrennungsmotorproduktion und erfordert neue Kernkompetenzen in Elektrotechnik, Wicklungstechnologie, Magnetverarbeitung und elektrochemischen Isolationssystemen. In Baden-Württemberg fungieren mehrere führende Unternehmen als Ankerakteure: Robert Bosch GmbH mit eCityTruck-Antriebslösungen, ZF Friedrichshafen AG mit integrierten e-Achsen, Mahle GmbH mit modularen E-Mobilitätslösungen und die Schaeffler-Gruppe mit elektrischen Achsantrieben. Ein Netzwerk spezialisierter Zulieferer deckt Teilprozesse ab.

Für den erfolgreichen Produktionsaufbau müssen Unternehmen fünf kritische Fertigungskompetenzen aufbauen.

Die erste Kernkompetenz ist die Blechpaketfertigung für Stator und Rotor mit hochpräzisem Stanzen, Schicht- und Paketierungstechnologien sowie Füge-technologien. Die Wertschöpfung liegt in automatisierten Prozessen und Werkzeugbau, Bereiche, in denen Baden-Württemberg durch Anlagenhersteller wie Schuler AG wettbewerbsfähig bleibt.

Die zweite Kernkompetenz ist die Wicklungstechnologie mit Flachdraht-Biegetechnologie, Hairpin-Insertion und Laser- oder TIG-Schweißen. Diese Prozesse erfordern hochautomatisierte Systeme und sind nicht manuell wirtschaftlich darstellbar. Die Wertschöpfung liegt in Anlagenentwicklung und Prozessoptimierung durch Hersteller wie TRUMPF und IPG Photonics.

Die dritte Kernkompetenz betrifft die Rotorfertigung. Für Permanentmagnet-Synchronmaschinen besteht ein Risiko in der Abhängigkeit von Seltenen Erden, weshalb ein Technologiewechsel zu fremderregten Synchronmaschinen

1 | bdtronic GmbH.

2 | TRUMPF SE + Co. KG.

3 | Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG.

4 | Carl Zeiss AG.

5 | Freudenberg SE.

6 | Excyte GmbH.

7 | SCHILLING ENGINEERING GmbH.

8 | Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg.

9 | Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC.

10 | Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB.

empfehlenswert ist. Die Wertschöpfung liegt in der Entwicklung alternativer Motorkonzepte und in automatisierten Montageprozessen, nicht in manueller Magnetmontage.

Die vierte Kernkompetenz umfasst Gehäuse, Kühlsystem und Systemintegration mit Druckguss, Kühlmantelfertigung und Präzisions-Montagetechnologie. Die Wertschöpfung entsteht durch hochautomatisierte Montage und durch Optimierungskompetenz, nicht durch manuelle Assemblierung.

Die fünfte Kernkompetenz ist Qualitätssicherung und Prüftechnik mit dynamischem Testen, elektrischer Prüfung und geometrischer Messtechnik. Diese Bereiche sind hochgradig automatisiert, Prüfstandhersteller wie AVL List und Messtechnik-Anbieter wie Zeiss sind führend.

Die zentrale Erkenntnis ist, dass die Wertschöpfung nicht in manuellen Tätigkeiten liegt, sondern in Spezialisierung, Automation und Technologie. Manuelle Wicklungs- oder Montageprozesse sind in Baden-Württemberg nicht wirtschaftlich durchführbar und werden in Niedriglohnländern stattfinden. Unternehmen sollten gezielt in Automatisierungslösungen und die Verlagerung von Fachkompetenz auf System- und Prozessebene investieren, durch Kooperationen mit Forschungseinrichtungen, Rekrutierung von Ingenieuren in Elektrotechnik und Automatisierung sowie Definition klarer Motorbaukästen.

Beschichten, Imprägnieren und die Herstellung von Magneten sind die Kompetenzen, die über die Metallverarbeitung hinausgehen. Daher kommen für den E-Motor ähnlich wie für Traktionsbatterien die Unternehmen Freudenberg, Zeiss, bdtronic und Dürr infrage. Diese Unternehmen liefern Expertise im Beschichten und Imprägnieren. In Baden-Württemberg stellt die MS-SCHRAMBERG GmbH & CO. KG Neodymmagnete her, die auch für die Herstellung von permanent erregten Maschinen notwendig sind.¹

Auch für die Fertigung von E-Motoren existieren Forschungseinrichtungen, in denen die Weiterentwicklung sowie die Produktion von E-Motoren erforscht werden. Das Elektrotechnische Institut (ETI) vom KIT sowie das Institut für Elek-

trische Energieumwandlung (IEW) der Universität Stuttgart und der Lehrstuhl Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen betreiben Forschung auf dem Gebiet der E-Motoren. Der Fokus des IEW liegt dabei auf der Konstruktion und Auslegung von Reluktanzmaschinen und Regelungsstrategien.² Das ETI betreibt Prüfstände für E-Motoren und das PEM partizipiert an der Erforschung der Produktionsprozesse, des Testings und dem Einsatz verschiedener Materialien.³

Leistungselektronik

Bereits in der Leistungselektronik aktiv sind Bosch, ZF, MAHLE, Schaeffler und TRUMPF.

Ein naheliegender Einstieg in die Leistungselektronik ergibt sich für Unternehmen, die bereits heute dicht an der Industrialisierung von Hochvoltbaugruppen arbeiten. bdtronic verfügt über Prozesslösungen für Dosieren und Verguss und adressiert dabei Anwendungen im Kontext der Batteriefertigung.⁴ Dieses Kompetenzprofil lässt sich weiterentwickeln, etwa über robuste Vergusskonzepte, Dichtprozesse, reproduzierbare thermische Schnittstellen und die hochautomatisierte Applikation in der Produktion von Leistungselektronik. Herrmann Ultraschall bietet Fügetechnologien für elektrische Verbindungen in Batterieanwendungen und adressiert dabei auch hochstromfähige Kontaktierungen wie Busbars und metallische Verbindungen.⁵ Daraus ergibt sich eine Entwicklungslinie in Richtung Busbar-Fertigung für Inverter, DC/DC-Wandler und PDU. Freudenberg ist mit e-Power Systems im Batterie- und Brennstoffzellenumfeld positioniert und adressiert Anwendungen für nachhaltige Mobilität, wodurch sich die Option eröffnet, auch die Leistungselektronik zu erschließen.

Darüber hinaus bieten klassische Anlagen- und Prozessausrüster ein attraktives Eintrittsfenster, weil sich Wettbewerbsfähigkeit in der Leistungselektronik häufig weniger über die Schaltungstopologie als über eine beherrschte Industrialisierung in hohen Stückzahlen entscheidet. Erfolgsentscheidend sind hierbei stabile Prozessfenster, reproduzierbare thermische Anbindung, sichere Isolation, EMV-robuste Auslegung

1 | MS-Schramberg GmbH & Co. KG.

2 | Institut für Elektrische Energieumwandlung.

3 | Elektrotechnisches Institut.

4 | bdtronic GmbH.

5 | Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG.

und eine durchgängige Inline-Qualitätssicherung bis hin zu End-of-Line-Tests. In dieser Logik können Unternehmen aus Automations- und Sondermaschinenbau, Präzisionsfertigung sowie Mess- und Prüftechnik in klar abgegrenzte Teilumfänge einsteigen, entweder als prozessnaher Lieferant kompletter Fertigungslinien oder als Komponentenlieferant, etwa für Gehäuse, Kontaktierung, Kühlung, Isolation, Vergussmaterialien und Testkonzepte. Voraussetzung ist typischerweise der systematische Aufbau von Hochvolt-Sicherheits- und Testkompetenz sowie belastbarer Partnerschaften entlang der Halbleiter-, Modul- und Systemlieferkette. Als Kooperationspartner aus der Forschung ist das Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (ILEA) der Universität Stuttgart geeignet, da die Forschungsschwerpunkte dort auf Leistungselektronik und e-Mobilität liegen.¹ Das Institut für Halbleitertechnik der Universität Stuttgart ergänzt diese Kompetenzen.

Brennstoffzelle

Für die Produktion von Brennstoffzellen sind neben metallverarbeitenden Kompetenzen insbesondere der Umgang mit beziehungsweise die Herstellung von Membranen, Dosierprozessen und Reinraumkompetenz erforderlich.

Für den Kompetenzbereich Dosieren wurden bereits DOPAG und RAMPF identifiziert. Perspektivisch könnten diese ihr Portfolio um Dünnfilmextrusion zur Herstellung von Membranen erweitern. Unternehmen wie Mann + Hummel, Purem und fumatech verfügen bereits über Kompetenzen im Umgang mit beziehungsweise in der Herstellung von Membranen.^{2,3} fumatech stellt Membranen für Brennstoffzellen her, während die übrigen Unternehmen ihre Expertise über Membranen und Filtertechnik durch Kooperationen in Richtung Brennstoffzellensysteme ausbauen könnten.⁴

Darüber hinaus ist die Abgasnachbehandlung bei Brennstoffzellensystemen relevant, insbesondere die Abscheidung von dampfförmigem Wasser aus dem Abgas durch geeignete Bauteile. Hierfür liegt ein Transferpotenzial bei Unter-

nehmen, die bereits Abgasnachbehandlung für Dieselantriebe bearbeiten.

Wasserstoff-Peripherie

Für Wasserstoffsysteme ist die Herstellung von Tanks ein wesentlicher Baustein. Hierfür werden Kompetenzen in der Fertigung kohlefaserverstärkter Bauteile, insbesondere Wickeltechnologien, benötigt. DYNEXA sowie Ernst Kühne Kunststoff GmbH & Co. KG werden als Kompetenzträger in der Fertigung kohlefaserverstärkter Bauteile eingeordnet, deren Fähigkeiten durch geeignete Kooperationen und Forschung auf die Produktion von Wasserstofftanks übertragen werden könnten.^{5,6}

Zur Peripherie zählen zudem weitere aktive und passive Hochdruckkomponenten. Hersteller von Pumpen, Ventilen und Leitungen können ihr Portfolio erweitern, indem sie ihre Produkte für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff auslegen.

Christian Bürkert GmbH & Co. KG sowie GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG sind Beispiele für Ventilhersteller, deren Portfolio perspektivisch um wasserstofftaugliche Ventile für den automobilen Einsatz erweitert werden könnte.^{7,8} Zur Auslegung für den Wasserstoffbetrieb können Kooperationen mit materialwissenschaftlichen Kompetenzträgern wie der Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart oder dem Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) dienen.

Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Für Forschung und Produktion von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren werden Unternehmen als geeignet bewertet, die bereits im Verbrennungsmotor-Segment tätig sind. Besonders Bosch ist in Baden-Württemberg in der Motorenentwicklung aktiv und auch für die Entwicklung von Wasserstoff-Motoren prädestiniert. Weitere Komponenten sind für die Verwendung von Wasserstoff an höhere Betriebsdrücke anzupassen, weshalb Materialwissenschaften und

1 | Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe.

2 | MANN+HUMMEL International GmbH & Co. KG.

3 | Purem GmbH.

4 | BWT Holding GmbH.

5 | Dynexa GmbH & Co. KG.

6 | Ernst Kühne Kunststoffwerk GmbH & Co. KG.

7 | Christian Bürkert GmbH & Co. KG.

8 | GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG.

Produktionsplanung als relevante Kompetenzfelder abgeleitet werden. Diese Kompetenzen können auch hier durch Kooperationen mit geeigneten Forschungseinrichtungen, wie der MPA der Universität Stuttgart oder dem Fraunhofer ICT, in Unternehmen etabliert werden.

5.4 Kompetenzentwicklung und Kompetenzbedarf

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die zentralen Komponenten der alternativen Antriebsstränge Traktionsbatterie, Elektromotor, Leistungselektronik, Brennstoffzelle und Wasserstoff-Verbrennungsmotor hinsichtlich ihrer Produktstruktur, Wertschöpfungsschwerpunkte und Fertigungskompetenzen beschrieben. Anschließend wurde untersucht, in welchem Umfang diese Kompetenzen in Baden-Württemberg bereits vorhanden sind und wo im Vergleich zum klassischen Dieselantriebsstrang zusätzliche Kompetenzbedarfe bestehen. Der Dieselerbrennungsmotor dient dabei als Referenztechnologie, da seine Wertschöpfung in Baden-Württemberg durch eine dichte Unternehmenslandschaft aus Motorenherstellern, Tier-1- und Tier-2-Zulieferern sowie Maschinen- und Anlagenbauunternehmen gut etabliert ist.

5.4.1 Vorgehen der Gap-Analyse

Ausgangspunkt der Analyse ist das in Kapitel 5.2 abgeleitete Kompetenzportfolio entlang der Fertigungsketten der betrachteten Antriebsstränge. Für jede Technologie wurden die relevanten Wertschöpfungsstufen (von der Halbzeugfertigung über die Komponentenfertigung hin zur Systemintegration) und die dafür notwendigen Kernkompetenzen (zum Beispiel Gießen, Zerspanen, Pulvermetallurgie, Wicklungstechnik, keramische Prozesse, Leistungshalbleiterfertigung) identifiziert. Diese Kompetenzelemente werden anschließend mit dem bestehenden Kompetenzprofil Baden-Württembergs verglichen, das sich im Wesentlichen aus der dominierenden Rolle des Verbrennungsmotors, einem starken Maschinen- und Anlagenbau, einer ausgeprägten Metall- und Kunststoffverarbeitung sowie ausgewählten Elektronik- und Softwarekompetenzen speist. Der Gap wird qualitativ in drei Stufen bewertet:

- **Hohe Deckung/Transferkompetenzen:** Kompetenzen sind in der Region breit vorhanden und können mit begrenztem Anpassungsaufwand auf alternative Antriebe übertragen werden.

- **Teilweise Deckung/Erweiterungskompetenzen:** Grundkompetenzen sind vorhanden, es besteht jedoch Bedarf an Spezialisierung, Skalierung oder Technologiesprung.
- **Geringe Deckung/neue Schlüsselkompetenzen:** Kompetenzen sind nur in Nischen oder gar nicht vorhanden; ein Aufbau neuer industrieller Aktivitäten wäre erforderlich.

5.4.2 Technologiespezifische Kompetenzgaps

Verbrennungsmotorischer Antriebsstrang (Referenz):

Die Fertigung schwerer Dieselerbrennungsmotoren stützt sich stark auf Gießereitechnik, Zerspanung, Schmieden, Wärmebehandlung und Montage. Diese Prozesse sind in Baden-Württemberg traditionell stark vertreten und bilden die Basis eines Netzwerks aus Gießereien, Metallverarbeitern und Motorenherstellern. Aus Sicht der alternativen Antriebe stellen diese Kompetenzen einerseits einen bedeutenden Transformationspuffer dar, andererseits besteht das Risiko struktureller Überkapazitäten, wenn die Nachfrage nach klassischen Verbrennungsmotoren zurückgeht und kein systematischer Kompetenztransfer erfolgt.

Traktionsbatterie:

Auf der Batterieebene zeigt sich ein ausgeprägter Kompetenzgap zwischen Zellfertigung und Systemintegration:

- **Zellebene:** Die in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Kompetenzen in Elektrodenfertigung, Beschichtungs- und Trocknungsprozessen, Kalandrieren, Zellassemblierung und Formierung sind in Baden-Württemberg bisher nur punktuell vorhanden. Chemische Grundkompetenzen und Materialentwicklung existieren im Land, großskalige Zellfertigung mit hohen Automatisierungsgraden und spezifischer Produktionserfahrung ist jedoch erst im Aufbau. Insbesondere Prozesswissen zu hochpräziser Beschichtung, Trockenraumtechnologien und Formierungsstrategien stellt ein neues Schlüsselkompetenzfeld dar (**geringe Deckung**).

- **Modul- und Packebene:** Mechanische Integration, Gehäusefertigung, Fügetechnik, Thermomanagement sowie elektrische Verschaltung bauen auf bestehenden Kompetenzen in der Struktur- und Fahrzeugintegration sowie im Kabelsatzbau auf. Hier besteht überwiegend eine hohe Deckung, jedoch Bedarf an Spezialisierung in Batterie-sicherheit, Isolationskonzepten, Batteriemangementsystemen und Hochvolt-Architekturen (**teilweise Deckung**).

In Summe ergeben sich hohe Wertschöpfungspotenziale insbesondere dort, wo Zellfertigung und vorgelagerte Materialproduktion aufgebaut werden können. Diese Felder weisen gleichzeitig den größten Kompetenzgap gegenüber der traditionellen Verbrennungsmotorfertigung auf.

Elektromotoren:

Die Fertigung der Elektromotoren (Abschnitt 5.2.3) greift an mehreren Stellen auf etablierte Kompetenzen zurück:

- **Stator- und Rotorblechpakete, Gehäuse, Wellen:** Stanzen, Zerspanung, Umformtechnik und Gießereiprozesse sind Kernkompetenzen des Maschinen- und Fahrzeugbaus in Baden-Württemberg (**hohe Deckung**).
- **Wickeltechnologien und Isolationssysteme:** Die Herstellung von Flachdrahtstatoren mit hohen Füllfaktoren, komplexen Biege- und Schweißprozessen und enger Toleranzführung stellt im Vergleich zu klassischen elektrischen Maschinen erhöhte Anforderungen. Hier bestehen zwar Grundkompetenzen in der Elektromotorfertigung, die Großserienfertigung von hochintegrierten Traktionsmaschinen mit Flachdrahttechnik ist jedoch nur bei wenigen Akteuren vertreten (**teilweise Deckung**).
- **Magnetfertigung und Umgang mit Seltenen Erden:** Magnetsinterprozesse, Magnetisierungstechnik sowie das prozesssichere Handling von Permanentmagneten sind in der Region kaum industriell verankert. Wertschöpfung findet überwiegend in vorgelagerten internationalen Lieferketten statt (**geringe Deckung**).

Damit ergeben sich für Elektromotoren vor allem Kompetenzbedarfe in spezialisierten Wicklungs- und Magnetprozessen sowie in der Serienautomatisierung dieser Prozessketten. Gleichzeitig bieten zahlreiche mechanische und umformende

Prozessschritte gute Anknüpfungspunkte für den Transfer bestehender Verbrennungsmotorkompetenzen.

Leistungselektronik:

Die in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Wertschöpfungsschritte der Leistungselektronik, vom Halbleiterwafer über DCB-Substrate und Leiterplattenfertigung bis hin zur Modul- und Inverterassemblierung, weisen ein heterogenes Kompetenzbild auf:

- **Halbleiterfertigung (SiC, GaN):** Die eigentliche Chipfertigung ist in Europa stark konzentriert und in Baden-Württemberg nur in sehr begrenztem Umfang vorhanden. Für die Traktionsleistungselektronik kann diese Stufe derzeit kaum regional integriert werden (**geringe Deckung**).
- **Leiterplatten- und DCB-Fertigung:** Grundkompetenzen in der Leiterplattenfertigung und mit keramischen Substraten sind vorhanden, allerdings bislang primär für Industrieelektronik und nicht in großskaligen Automotive-Anwendungen mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen. Hier besteht Bedarf an Skalierung und Automotive-Spezialisierung (**teilweise Deckung**).
- **Modul- und Inverterintegration:** Montage, Gehäusefertigung, Kühlkörperbearbeitung, Sensorintegration und Prüfprozesse greifen auf bestehende Maschinenbau-, Mechatronik- und Testkompetenzen zurück (**hohe bis teilweise Deckung**).

Insgesamt besteht der größte Kompetenzgap in vorgelagerten Halbleiterprozessen sowie in der spezifischen Automotive-Erfahrung mit SiC- und GaN-Leistungshalbleitern. Chancen bestehen vor allem in der Ausweitung von Modul- und Inverterfertigung sowie in Test- und Validierungskompetenzen.

Brennstoffzellensysteme:

Für Brennstoffzellensysteme (Abschnitt 5.2.5) ist die Situation zweigeteilt:

■ **Stack-Komponenten (MEA, Bipolarplatten, Stackassemblierung):** Die Herstellung von Membran-Elektroden-Einheiten mit katalytischen Beschichtungen, die Verarbeitung protonenleitender Ionomere, hochpräzise Beschichtungsprozesse sowie die Fertigung und Beschichtung metallischer oder graphitischer Bipolarplatten stellen für Baden-Württemberg größtenteils neue Kompetenzfelder dar. Es existieren Forschungs- und Pilotaktivitäten, jedoch keine breit etablierte industrielle Fertigung (**geringe Deckung**).

■ **Brennstoffzellen-Peripherie und Balance-of-Plant:** Kompressoren, Pumpen, Ventile, Wärmetauscher, Kühlsysteme, Steuergerätesoftware und Sensorik bauen zu großen Teilen auf bestehenden Kompetenzen im Maschinenbau, in der Hydraulik und in der Automobilindustrie auf (**hohe Deckung**).

Damit ergibt sich ein deutliches Bild: Während große Teile der peripheren Systeme mit vorhandenen Kompetenzen adressiert werden können, sind Stackfertigung und vorgelagerte Materialproduktion (Membranen, Katalysatoren) als strategische neue Schlüsselkompetenzen mit hohem Aufbau- und Investitionsbedarf zu sehen.

Wasserstoff-Verbrennungsmotor:

Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor (Abschnitt 5.2.5) nutzt wesentliche Komponenten des klassischen Dieselmotors, insbesondere Strukturbauteile, Kurbeltrieb, Ventiltrieb und große Teile der Peripherie. Die Fertigungskompetenzen in Gießen, Zerspanung, Schmieden und Montage sind daher in Baden-Württemberg in hohem Maße vorhanden (**hohe Deckung**).

Neue beziehungsweise erweiterte Kompetenzbedarfe ergeben sich aus:

- der Auslegung und Fertigung wasserstofftauglicher Einspritzsysteme,
- Werkstoff- und Dichtungskonzepten für wasserstoffinduzierte Versprödung,

- der Anpassung der Abgasnachbehandlung an veränderte Emissionscharakteristika sowie
- der Integration von Hochdruckspeichersystemen und zugehöriger Sicherheitskomponenten.

Diese Elemente sind im Vergleich zu FCET weniger komplex, erfordern jedoch die zielgerichtete Weiterentwicklung existierender Verbrennungsmotor- und Erdgas-Kompetenzen (**teilweise Deckung**).

In Abbildung 47 wird das technologiespezifische Kompetenzmapping in einer Ampellogik zusammengefasst. Für jede betrachtete Technologie beziehungsweise deren Subsystemebene wird der Deckungsgrad der Fertigungskompetenzen in Baden-Württemberg entlang der im Dokument definierten Fertigungskategorien bewertet. Grün kennzeichnet eine hohe Deckung (breit vorhandene industrielle Basis), Gelb eine teilweise Deckung (Transfer grundsätzlich möglich, jedoch mit Lücken in Großserienfähigkeit, Prozessfenstern oder Automotive-Spezialisierung) und Rot eine geringe Deckung (Kompetenzen nur punktuell, hoher Aufbau- und Investitionsbedarf). Die Darstellung ermöglicht eine schnelle Identifikation von Transferpotenzialen über Querschnittsprozesse sowie von prioritären Kompetenzaufbaupfaden in Zukunftstechnologien.

	Ur- und Umformprozesse	Spanende Bearbeitung	Thermisch/pulvermetallurgisch	Fügetechnologien	Oberflächen/Beschichten/Imprägnieren	Keramik/Spezialprozesse/Laser	Faserverbund/Laminieren	Montage/Integration	Prüfung/Test/Qualität	Elektronikfertigung/-integration
ICET (Referenz)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Traktionsbatterie										
Zellebene	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Modul/Pack	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Elektromotor										
Strukturteile	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Wicklung/Isolation/Magnete	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Leistungselektronik										
Wafer/DCB/PCB	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Modul-/Inverterintegration	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Brennstoffzellensysteme										
Stack/MEA/BPP	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Brennstoffzellen-Peripherie	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
H2-ICET										
Wasserstoff-Verbrennungsmotor	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Legende der Ampellogik: ■ hohe Deckung ■ teilweise Deckung ■ geringe Deckung ■ nicht primär relevant

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 47: Zusammenfassung der Gap-Analyse in Form einer Ampellogik

5.4.3 Querschnittliche Handlungsfelder

Über alle betrachteten Technologien hinweg lassen sich mehrere übergeordnete Kompetenzfelder identifizieren, in denen für Baden-Württemberg besonderer Handlungsbedarf besteht:

- **Chemie- und Materialkompetenzen für Batterie- und Brennstoffzellenkomponenten** (Aktivmaterialien, Elektrolyte, Membranen, Katalysatoren, Beschichtungen).
- **Hochautomatisierte Fertigungsprozesse** mit engen Toleranzen und hohen Sauberkeitsanforderungen, insbesondere in der Zell- und Stackfertigung sowie in der Wicklungs- und Modulassembly.

- **Magnet- und Halbleiterkompetenzen**, die heute weitgehend in internationalen Lieferketten verankert sind.
- **Systemintegration und Testkompetenzen** für Hochvolt-, Wasserstoff- und Brennstoffzellensysteme, einschließlich Sicherheits- und Normungswissen.

Gleichzeitig bestehen substanzielle Transferpotenziale aus der Fertigung von Verbrennungsmotoren, Getrieben und klassischen Fahrzeugkomponenten, insbesondere in den Bereichen Gießen, Zerspanung, Umformung, Montage sowie im Maschinen- und Anlagenbau. Die Herausforderung für Baden-Württemberg besteht darin, diese bestehenden Stärken gezielt in Richtung der identifizierten neuen Wertschöpfungsfelder zu

transformieren und gleichzeitig die klar benannten Kompetenzlücken in den Zukunftstechnologien systematisch zu adressieren.

Zentrale Erkenntnisse der Gap-Analyse

Hohe Deckung

- Gießen, Zerspanung, Umformung, Montage sowie zugehöriger Werkzeug-/Anlagenbau
- Stator-/Rotorblechpakete, Gehäuse und Wellen
- Kompressoren, Pumpen, Ventile, Wärmetauscher, Kühlsysteme, Sensorik/Steuerung

Teilweise Deckung

- Automatisierte Wicklungstechnologie
- Spezialisierungsbedarf bei Batteriesicherheit, Isolationskonzepten, BMS und HV-Architekturen
- PCB-/DCB-Fertigung: Skalierung und Automotive-Spezialisierung fehlen teilweise

Geringe Deckung

- Großskalige, automatisierte Zellproduktion
- SiC/GaN-Halbleiterfertigung
- MEA-Beschichtung/Ionomer-Verarbeitung sowie BPP-Fertigung und -Beschichtung

Bei der Bewertung regionaler Wertschöpfungspotenziale ist zu berücksichtigen, dass Personal- und Standortkosten weiterhin ein wesentlicher Treiber für die Lokalisierung von Fertigungskapazitäten sind und in kostengetriebenen Bauteilsegmenten zu einer Verlagerung in Regionen mit niedrigeren Lohnkosten beitragen können. Gleichzeitig variiert die Sensitivität stark nach Prozess und Automatisierungsgrad: In hochautomatisierten, qualitäts- und sicherheitskritischen Fertigungsschritten sowie in Industrialisierung, Test und Validierung relativiert sich der reine Lohnkostenhebel zugunsten von Prozessstabilität, Ausschussraten, Anlaufzeiten und Know-how-Schutz. Für Baden-Württemberg folgt daraus, Wertschöpfung gezielt in solchen Kompetenzfeldern abzusichern, in denen Produktivität, Integrationsfähigkeit und Qualitätsbeherrschung entscheidend sind, und zugleich Rahmenbedingungen für wettbewerbsfähige Serienproduktion durch Automatisierung, Qualifizierung und Skalierung zu stärken.

Ausgangspunkt der Betrachtung ist die in Abschnitt 5.1 abgeleitete Systemkostenstruktur der verschiedenen Antriebsstränge sowie die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Fertigungsprozesse und Kompetenzen. Für jede Technologie werden die Kostenanteile der zentralen Komponenten (Verbrennungsmotor, Batterie, Elektromotor, Leistungselektronik, Brennstoffzellenstack, Wasserstoffspeicher, Peripheriesysteme) mit den jeweiligen Wertschöpfungsanteilen der zugrunde liegenden Fertigungsverfahren verknüpft. Die so entstehenden „Wertschöpfungsbausteine“ werden anschließend auf Technologie- und Prozessebene aggregiert und mit den in Kapitel 4.2 beschriebenen Technologieszenarien bis 2035 verknüpft. Dadurch lässt sich für jedes Szenario qualitativ bestimmen, wie sich der Anteil der Wertschöpfung in den unterschiedlichen Prozess- und Kompetenzclustern entwickelt und welcher Teil davon potenziell in Baden-Württemberg erschlossen werden kann.

5.5 Wertschöpfungsentwicklung

Durch die bisherige Analyse wurde gezeigt, dass sich die Wertschöpfungsschwerpunkte der Antriebsstränge in alternativen Antriebskonzepten deutlich vom klassischen Dieselantrieb unterscheiden. Während beim Dieselantriebsstrang ein großer Teil der Wertschöpfung in gießerei- und zerspanungsintensiven Strukturbauteilen des Verbrennungsmotors sowie in der Abgasnachbehandlung entsteht, verschiebt sich die Wertschöpfung bei Batterie-, Brennstoffzellen- und Wasserstoffverbrennungsantrieben hin zu Energiespeichersystemen, elektrisch-mechanischen Wandlern und leistungselektronischen Komponenten. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie sich diese Verschiebungen bei wachsendem Anteil alternativer Antriebe in den bis 2035 betrachteten Marktszenarien auf die Wertschöpfung in Baden-Württemberg auswirken.

Abbildung 48 visualisiert diese Entwicklung als Wertschöpfungsflussdiagramm. Im Referenzjahr 2025 dominiert der verbrennungsmotorische Antriebsstrang mit rund 99% Marktanteil die Wertschöpfung im Antrieb. Innerhalb dieses Antriebsstrangs entfallen etwa 36,6% der Wertschöpfung auf Motor und Getriebe, 14,8% auf die Abgasnachbehandlung, 22,9% auf das Chassis, 11,0% auf das Fahrwerk und 14,0% auf weitere Komponenten. Batterie und Elektromaschine spielen mit zusammen weniger als 1% nur eine marginale Rolle. Die Wertschöpfung im Antriebsstrang ist damit stark auf motornahe Metallprozesse, die Abgasnachbehandlung und klassische Fahrwerks- und Strukturkomponenten konzentriert.

Für 2035 und das beispielhafte Szenario „Fokus Wasserstoff“ zeigt die Grafik ein vollständig anderes Bild: Die Wertschöpfung verteilt sich nun auf einen Mix aus batterieelektrischen (55 % Marktanteil), brennstoffzellenbasierten (30 %) und wasserstoffverbrennungsmotorischen Antrieben (15 %), während der klassische Dieselantrieb nur noch einen vernachlässigbaren Anteil von unter 1 % erreicht. Aggregiert über alle Technologien entfallen im Jahr 2035 rund 37,6 % der Antriebsstrangwertschöpfung auf Batterien, 12,0 % auf Brennstoffzellenstacks, 7,4 % auf Wasserstoffspeicher, 5,7 % auf Brennstoffzellenperipherie sowie 3,3 % auf Elektromotor und Getriebe. Motor und Getriebe auf Verbrennerbasis tragen nur noch etwa 4,2 % zur Wertschöpfung bei, Antriebsperipherie und Abgasnachbehandlung zusammen lediglich rund 2,4 %. Chassis und Fahrwerk bleiben mit zusammen etwa 17 % ein stabiler, weitgehend technologieneutraler Wertschöpfungsblock, während der Anteil unspezifischer „anderer“ Komponenten bei rund 11,4 % liegt. Der Marktanteil dieser Rumpfkompenten bleibt gleich, während ihr Anteil an den Herstellungskosten aufgrund der Preissteigerung der Fahrzeuge sinkt.

Für Baden-Württemberg bedeutet dies, dass ein erheblicher Teil der bisherigen Wertschöpfung im Bereich Verbrennungsmotor und Abgasnachbehandlung sukzessive an Bedeutung verliert, sofern die entsprechenden Kapazitäten nicht in Richtung neuer Produkte und Prozesse transformiert werden. Das Wertschöpfungsflussdiagramm macht sichtbar, dass die bisherigen Wertschöpfungsanteile von Motor, Abgasnachbehandlung und antriebsnaher Peripherie nur zu einem kleinen Teil in wasserstoffverbrennende Antriebe überführt werden können. Ein Teil der gießerei- und zerspanungsintensiven Wertschöpfung kann jedoch durch Komponenten der Elektromotoren, Gehäuse von Leistungselektroniken sowie strukturelle Elemente von Batterie- und Brennstoffzellensystemen aufgefangen werden. Gleichzeitig bedarf es neuer, heute in der Region nur begrenzt verankerter Wertschöpfungsfelder in der Zell- und Stackfertigung, in der Magnetverarbeitung sowie in der Produktion leistungselektronischer Module, Bereiche, die im aggregierten Bild bereits knapp zwei Drittel der zukünftigen Antriebsstrangwertschöpfung ausmachen. Je nach Szenario verschieben sich die Schwerpunkte dieser neuen Felder:

- In Szenarien mit starkem Hochlauf batterieelektrischer Fahrzeuge dominiert die Batterie als Einzelkomponente den Antriebsstrang; ihr Anteil an der Wertschöpfung übersteigt den des klassischen Verbrennungsmotors deutlich. Elektromotor und Leistungselektronik gewinnen

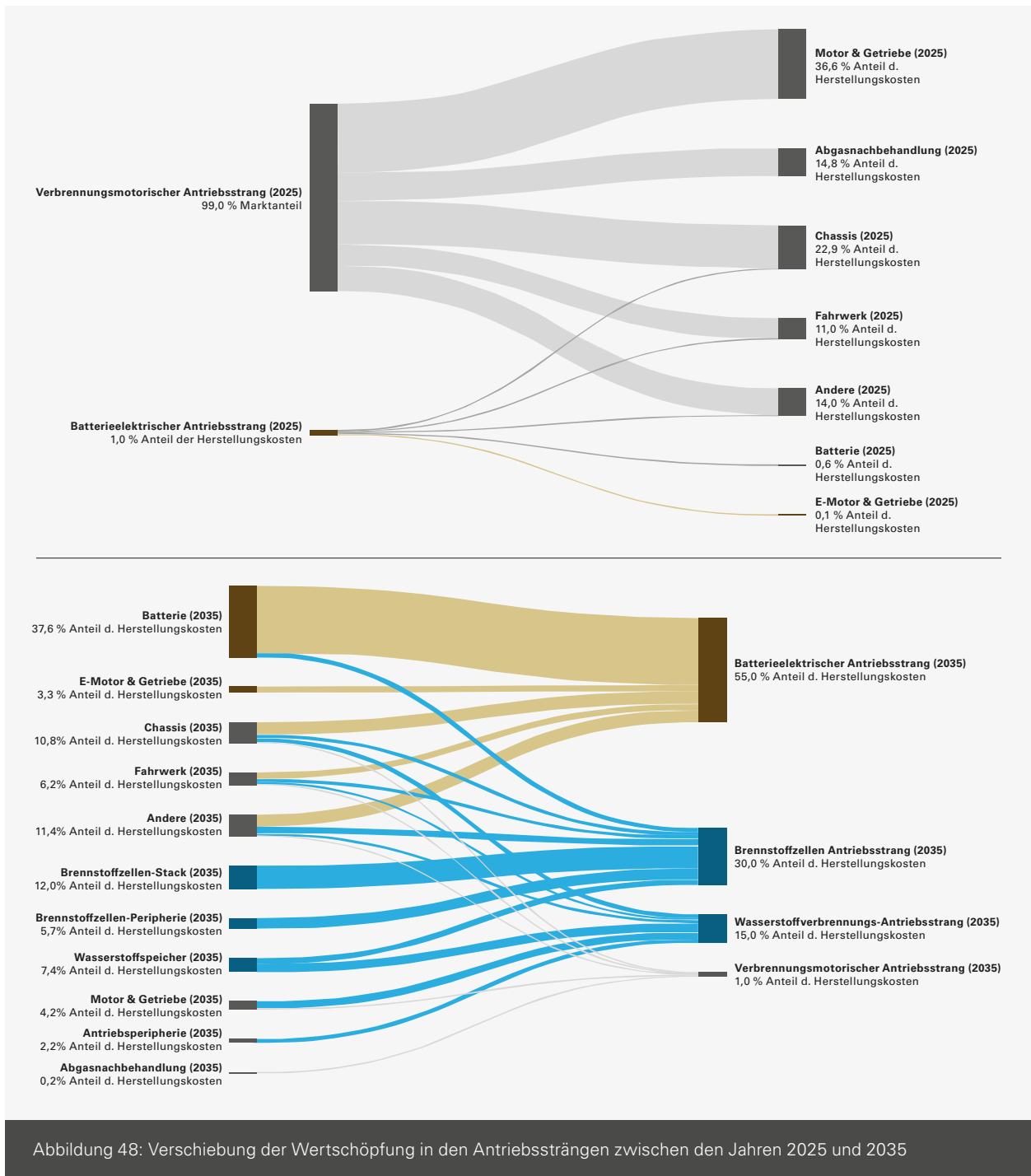
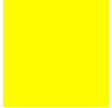
zusätzlich an Gewicht, bleiben jedoch im aggregierten Bild hinter der Batterie zurück.

- In Szenarien mit hohen Anteilen von Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Verbrennungsmotoren wächst die Bedeutung der Wasserstoffspeicher, der Brennstoffzellenstacks und der Brennstoffzellenperipherie. Der Verbrennungsmotor bleibt als Teil des Wasserstoff-Verbrennungskonzepts in bestimmten Segmenten ein relevanter Wertschöpfungsträger, kann die Verluste im konventionellen Diesengeschäft aber nur teilweise kompensieren.

Die Wertschöpfungsentwicklung kann somit als Kombination aus Substitution, Transformation und Erweiterung beschrieben werden:

- **Substitution** klassischer motorbezogener Wertschöpfung durch batterie-, brennstoffzellen- und wasserstoffspeicherbezogene Prozesse, sichtbar am Rückgang des Wertschöpfungsanteils von Motor, Antriebsperipherie und Abgasnachbehandlung von zusammen über 50 % im Jahr 2025 auf weniger als 10 % im Jahr 2035.
- **Transformation** bestehender metallverarbeitender Kompetenzen in Richtung Komponenten von Elektromotoren, Leistungselektroniken, Batteriemodulen und Wasserstoffsystemen, die weiterhin Gieß-, Zerspan- und Fügeverfahren erfordern, allerdings in neuen Produktarchitekturen.
- **Erweiterung** der regionalen Wertschöpfung durch neue Kompetenzfelder mit hohem Wachstumspotenzial, etwa in chemischer Prozesstechnik (Zellproduktion), keramischen und Verbundwerkstoffprozessen (Stacks, DCB-Substrate) sowie Halbleiter- und Magnettechnologien, die heute überwiegend außerhalb der Region verortet sind.

Insgesamt zeigt Abbildung 48 damit nicht nur eine Verschiebung der Marktanteile zwischen den Antriebstechnologien, sondern die Neuordnung kompletter Wertschöpfungssysteme. Für Baden-Württemberg ergibt sich daraus die strategische Aufgabe, bestehende Stärken in der Metallverarbeitung und Systemintegration gezielt in die neuen Wertschöpfungsfelder von Batterie, Brennstoffzelle, Wasserstoffspeicher, Elektromotor und Leistungselektronik zu überführen und gleichzeitig neue, bislang wenig ausgeprägte Kompetenzfelder aufzubauen, um an den künftigen Wertschöpfungszuwächsen der Antriebswende zu partizipieren.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 48: Verschiebung der Wertschöpfung in den Antriebssträngen zwischen den Jahren 2025 und 2035

5.6 Synergieanalyse

Aufbauend auf den in den Abschnitten 5.1 und 5.2 beschriebenen Wertschöpfungsverschiebungen und Kompetenzbedarfen stellt sich abschließend die Frage, welche Konsequenzen

sich aus einer parallelen Entwicklung mehrerer Antriebsstrangtechnologien für Unternehmen in Baden-Württemberg ergeben. Im Mittelpunkt stehen dabei mögliche Synergien und Barrieren, die sich aus der gleichzeitigen Bearbeitung von diesel-, batterieelektrischen, brennstoffzellenbasierten und

wasserstoffverbrennungsmotorischen Antrieben ergeben und die strategische Positionierung der Unternehmen wesentlich beeinflussen.

Methodisch basiert die Synergieanalyse auf drei Schritten. Erstens werden die in Abschnitt 5.2 identifizierten Querschnittsprozesse und Basisfertigungskompetenzen wie Gießen, Zerspanen, Umformen, Wärmebehandlung, Fügen, Montage und Prüfung technologieübergreifend zusammengefasst. Zweitens wird für jede dieser Kompetenzgruppen qualitativ bewertet, in welchem Umfang sie sich zwischen den betrachteten Antriebssträngen wiederverwenden oder mit begrenztem Anpassungsaufwand weiterentwickeln lässt. Drittens werden diese Ergebnisse mit den in Kapitel 4 beschriebenen Technologieszenarien bis 2035 abgeglichen, um technologie- und szenariospezifische Chancen und Risiken einer Diversifikation in mehrere Antriebstechnologien abzuleiten.

Im Rahmen dieser Studie werden Synergien verstanden als die Möglichkeit, bestehende Ressourcen, insbesondere Fertigungsverfahren, Anlagen, Organisationseinheiten und Kompetenzen, in mehreren Antriebsstrangtechnologien gemeinsam zu nutzen. Synergien liegen vor, wenn zusätzliche Technologien mit geringeren Mehrinvestitionen erschlossen werden können oder wenn sich durch geteilte Ressourcen die Stückkosten senken lassen (Economies of Scope). Demgegenüber werden Barrieren als zusätzliche Anforderungen, Schnittstellen und Investitionen verstanden, die speziell durch die parallele Bearbeitung mehrerer Antriebsstränge entstehen und die Wirtschaftlichkeit der Diversifikation mindern.

Technische Synergien und technologiespezifische Barrieren

Die vorangegangenen Kapitel zeigen, dass zentrale Fertigungskompetenzen in allen betrachteten Antriebssträngen in ähnlicher Form benötigt werden. Gießerei- und Zerspanprozesse für komplexe Strukturbauteile des Verbrennungsmotors können beispielsweise teilweise für Gehäuse von Elektromotoren, Leistungselektroniken oder Batterie- und Brennstoffzellensystemen weitergenutzt werden. Ähnliches gilt für Umform- und Fügeverfahren bei Gehäusen, Rohren und Leitungen sowie für Montage- und Prüfprozesse in der Endmontage. Diese „Basiskompetenzen“ bilden die technische Grundlage für Synergien: Unternehmen, die bereits über hochautomatisierte Linien zur Bearbeitung von Strukturbauteilen, zur Gehäusefertigung oder zur präzisen Montage verfügen, können einen Teil ihrer vorhandenen Ausstattung und ihres

Know-hows auch in alternativen Antriebstechnologien einsetzen.

Gleichzeitig entstehen technologiespezifische Zusatzanforderungen, die über die vorhandene Kompetenzbasis hinausgehen. Dazu zählen insbesondere die Elektroden- und Zellfertigung für Traktionsbatterien, die Membran-, Katalysator- und Bipolarplattenfertigung in Brennstoffzellenstacks, die Verarbeitung von Permanentmagneten sowie die Herstellung von Leistungshalbleitern und leistungselektronischen Modulen. Diese Prozessketten erfordern neue Materialien, Reinraum- und Trocknungsumgebungen, hochpräzise Beschichtungs- und Sintertechnologien sowie spezielle Prüfverfahren. Die Möglichkeit, hier auf bestehende metallverarbeitende Kompetenzen aufzubauen, ist begrenzt. Entsprechend hoch sind die technologiespezifischen Markteintrittsbarrieren, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen.

Organisatorische Effekte der parallelen Entwicklung mehrerer Antriebsstränge

Organisatorisch führt die parallele Entwicklung mehrerer Antriebsvarianten zu einer deutlichen Erhöhung der Komplexität in Produktentstehung und Produktion. Entwicklungsabteilungen müssen zusätzlich zu konventionellen Antrieben Kompetenzen in Batterie- und Brennstoffzellensystemtechnik, Leistungselektronik, Hochvoltsicherheit, Software und funktionaler Sicherheit aufbauen und in bestehende Entwicklungsprozesse integrieren. Dadurch erhöhen sich Abstimmungsaufwände, Schnittstellen und Abhängigkeiten innerhalb der Organisation. Die Gefahr besteht, dass Entwicklungsressourcen auf zu viele Technologiepfade verteilt werden und sich die Time-to-Market einzelner Lösungen verlängert.

In der Fertigung steigen Planungs- und Steuerungsaufwände durch höhere Variantenvielfalt und zusätzliche Qualitätsanforderungen. Neben klassischen mechanischen Prozessketten sind beispielsweise Gefährgut- und Hochvoltanforderungen zu berücksichtigen, etwa beim Handling von Batteriemodulen oder Wasserstoffsystemen. Logistische Prozesse müssen an neue Bauteilstrukturen, unterschiedliche Temperatur- und Sauberkeitsanforderungen sowie an neue Prüfkriterien angepasst werden. Diese Mehraufwände können reduziert werden, wenn es gelingt, modulare Plattformstrategien zu etablieren, etwa gemeinsame Gehäuse- und Kühlsystemplattformen für Elektromotoren und Leistungselektroniken oder standardisierte Schnittstellen zwischen Energiespeichersystemen und Fahrzeugintegration.

Finanzielle Implikationen und Investitionsbedarf

Finanziell sind die notwendigen Investitionen stark technologiespezifisch geprägt. Ein Teil der Investitionen in Maschinen und Anlagen, beispielsweise Zerspanungszentren, Umformtechnik, generische Montage- und Prüftechnik, kann über mehrere Antriebsstränge hinweg genutzt werden. Hier entstehen Synergien, wenn zusätzliche Varianten ohne grundlegende Anpassung der Infrastruktur integriert werden können. Demgegenüber erfordern insbesondere die Batteriezellfertigung, die Brennstoffzellenproduktion, die Leistungselektronikfertigung und die Halbleitertechnologie hohe, weitgehend irreversible Anfangsinvestitionen mit langen Amortisationszeiten. Investitionsentscheidungen in diesen Bereichen sind damit eng an erwartete Stückzahlen und an die Stabilität der zugrunde liegenden Technologieszenarien gekoppelt.

Für große OEM und Tier-1-Zulieferer kann eine Diversifikation in mehrere Antriebstechnologien eine sinnvolle Absicherungsstrategie sein. Sie können erhebliche Investitionsmittel bündeln, Skaleneffekte über mehrere Fahrzeugplattformen nutzen und kritische Querschnittstechnologien wie Leistungselektronik, Elektromotoren oder Wasserstoffsysteme intern aufbauen. Für kleine und mittlere Unternehmen ist die parallele Erschließung mehrerer technologischer Kompetenzfelder dagegen häufig nicht darstellbar. Hier besteht das Risiko, dass begrenzte finanzielle und personelle Ressourcen auf zu viele Felder verteilt werden und damit die Wettbewerbsfähigkeit in den jeweiligen Kernbereichen geschwächt wird.

Szenarioabgleich und strategische Einordnung für unterschiedliche Stakeholdergruppen

Der Abgleich der identifizierten Kompetenzbedarfe mit den in Kapitel 4 beschriebenen Marktszenarien zeigt, dass nicht jede Kompetenz in jedem Szenario gleichermaßen relevant ist. Kompetenzen in der effizienten Großserienfertigung von Traktionsbatterien, in der Elektromotorenproduktion und in der Integration von Leistungselektronik werden in allen Szenarien stark nachgefragt. Spezialisierte Fähigkeiten in der Brennstoffzellenstackfertigung oder in der Wasserstofftanksystemproduktion gewinnen dagegen vor allem in Szenarien mit starkem Wasserstofffokus an Bedeutung. Für Unternehmen bedeutet dies, dass sie ihre Kompetenzentwicklungsstrategien eng mit den jeweils plausiblen Szenarien abgleichen müssen, um Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Für technologisch und finanziell stark aufgestellte OEM und Systemlieferanten eröffnet eine parallele Entwicklung mehrerer Antriebsstränge die Möglichkeit, Marktrisiken zu streuen, Skaleneffekte in Querschnittstechnologien zu nutzen und sich als Systemintegrator über den gesamten Technologiemix hinweg zu positionieren. Für spezialisierte Zulieferer und insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen liegt die Chance eher darin, jene Prozess- und Komponentenbereiche zu identifizieren, in denen sich technologische Synergien über mehrere Antriebsstränge ergeben, etwa in ausgewählten Fertigungsverfahren, in Prüf- und Testdienstleistungen, in Software und Systemintegration oder in Querschnittskomponenten wie Gehäusen, Kühlsystemen und Verbindungselementen, und dort gezielt Kompetenzen zu vertiefen.

Insgesamt lässt sich die Diversifikation in den Antriebstechnologien für Unternehmen in Baden-Württemberg weder eindeutig als Chance noch als Risiko bewerten. Sie wirkt vielmehr ambivalent und ist stark von der jeweiligen Ausgangslage, der verfügbaren Kapitalbasis und der strategischen Positionierung abhängig. Die Antriebswende stellt damit weniger eine einfache Substitution von Diesel- durch alternative Antriebe dar, sondern einen langfristigen Strukturwandel. Der Erfolg regionaler Unternehmen wird maßgeblich davon abhängen, in welchem Umfang es gelingt, technologische Synergien systematisch zu heben, Doppelaufwände in Entwicklung und Produktion zu begrenzen und den Aufbau neuer Kompetenzen eng mit den realistischen Technologieszenarien und Marktentwicklungen zu synchronisieren.

06

Handlungsempfehlungen und strukturelle Voraussetzungen

06

Handlungsempfehlungen und strukturelle Voraussetzungen

Die vorangegangene Gap-Analyse hat aufgezeigt, dass ein Handlungsbedarf besteht, um die zukünftig relevanten Technologien in Baden-Württemberg produzieren zu können und an der Wertschöpfung zu partizipieren. Die abgeleiteten Kompetenzbedarfe stellen ein wirtschaftliches Potenzial dar, das durch zukunftsorientiertes Handeln erschlossen werden kann. In diesem Kapitel werden konkrete Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteure der baden-württembergischen Industrie- und Forschungslandschaft geboten. Im Anschluss werden ergänzend dazu Handlungsempfehlungen präsentiert, um einen Hochlauf der ZET zu ermöglichen. Abschließend werden Anforderungen an die Gesetzgeber formuliert, damit eine nachhaltige Transformation der Nutzfahrzeugbranche in Baden-Württemberg gelingen kann.

6.1 Handlungsempfehlungen für die Transformation der Nutzfahrzeugbranche

Zu Beginn wird aufgeschlüsselt, welche Kompetenz weiterhin relevant ist und wie sie entwickelt werden kann, um an einem der Entwicklungsfelder zu partizipieren. Dazu wird auch eine Einschätzung der Komplexität gegeben und die Komponenten aufgeschlüsselt, die Teil des jeweiligen Entwicklungsfeldes sind. Nach den komponentenspezifischen Handlungsempfehlungen folgen Handlungsempfehlungen, die von der Unternehmensgröße abhängen.

Kompetenzspezifische Handlungsempfehlungen

Die bestehenden Kompetenzen lassen sich in querschnittliche Fähigkeiten sowie in komponenten- und subkomponentenbezogene Kompetenzen gliedern. Dies ist in der Tabelle 7 aufgeführt. Die Komplexität eines Entwicklungsfeldes bündelt die technologische Entwicklungsherausforderung, die wirtschaftliche Umsetzungs- und Skalierungsherausforderung sowie

den daraus resultierenden Zeithorizont bis zur Serienreife. Bei niedriger Komplexität (leerer Kreis) wird, auf Basis der aktuell verfügbaren Kompetenzen, ein vergleichsweise geringer zusätzlicher Entwicklungs- und Industrialisierungsaufwand erwartet. Entsprechend erscheint eine frühe Markterschließung beziehungsweise kurze Time-to-Production plausibel. Ein ausgefüllter Kreis kennzeichnet dagegen eine hohe Komplexität. Die Serienreife wird erst in einem späteren Zeithorizont erwartet und ist typischerweise mit höheren Investitionen, größerer Unsicherheit im Hochlauf sowie erhöhten wirtschaftlichen Risiken verbunden. Die Bewertung ist damit keine Aussage über die Attraktivität eines Entwicklungsfeldes, sondern eine Einordnung des erwarteten Aufwands und Risikos bis zur skalierbaren Serienproduktion.

Querschnittliche Kompetenzen befinden sich insbesondere in der Qualitätssicherung sowie im Anlagenbau. In der Qualitätssicherung ist zwischen Inline-Prüfung und End-of-Line-Prüfung zu unterscheiden. Beide sind für die Sicherung der Produktqualität aller in dieser Studie betrachteten Technologien relevant. Die Prüfung einer (Sub-)Komponente am Ende einer Linie ist deutlich weniger komplex als eine integrierte Inline-Qualitätssicherung, da letztere mit den Taktzeiten, Prozessschwankungen und Umgebungsbedingungen der Produktion kompatibel sein muss. Inline-Prüfkonzepte erfordern daher eine enge, gemeinsame Entwicklung mit den Anlagenherstellern.

Im Anlagenbau steckt aufgrund des dort erschließbaren Automatisierungspotenzials ein erhebliches Wertschöpfungspotenzial, das in der Produktion von Verbrennungsmotoren und deren Subkomponenten bereits genutzt wurde. Die automatisierte Produktion von Traktionsbatterien, Brennstoffzellensystemen und Elektromotoren ist vor diesem Hintergrund ein naheliegendes Entwicklungsfeld. Die Digitalisierung dieser Produktionsumgebungen verspricht eine verbesserte Prozess-

überwachung und damit reduzierte Ausschussraten. Als weiteres querschnittliches Betätigungsfeld ist der Handel mit Nutzfahrzeugen und deren Komponenten zu nennen. Fahrzeuge mit emissionsfreien Antrieben besitzen nach der Erstnutzung einen relevanten Restwert. Der gezielte Aufbau eines Zweitmarktes, etwa durch Weiterverwendung, Remanufacturing, Instandsetzung oder recyclinggerechte Demontage ermöglicht es, von diesem Restwert zu profitieren und zugleich Ressourcen zu schonen.

Spezialisierte Produktionsumgebungen, bestehend aus Reinräumen und thermisch präzise konditionierten Umgebungsbedingungen, werden insbesondere für die Batterie-, Brennstoffzellen- und Leistungselektronikproduktion benötigt. Die Anpassung des bestehenden Portfolios an die Anforderungen dieser Produktionsumgebungen, etwa hinsichtlich Partikelreinheit, Temperatur- und Feuchtesteuerung oder ESD-Schutz, stellt ein eigenständiges Entwicklungsfeld dar.

Modul-, Komponenten und Subkomponentenebene

Auf der Komponentenebene liegt der niedrigstschwellige Einstiegspunkt in die Produktion von ZET und deren Subkomponenten. Bestehende Gieß-, Zerspanungs- und Umformkompetenzen lassen sich in die Gehäusefertigung nahezu aller diskutierten Subkomponenten überführen. Besonders hervorzuheben sind hier Cell-to-Pack- und Cell-to-Chassis-Konzepte im Rahmen der Batterieentwicklung, bei denen strukturelle Fahrzeugkomponenten direkt mit der Energiespeicherung verknüpft werden.

Eine naheliegende Transformationsoption bietet sich für Subkomponenten- und Komponentenhersteller des Verbrennungsmotors. Hier lautet die Handlungsempfehlung, bestehende Bauteile und Fertigungsprozesse an die höheren Druckanforderungen und Flammgeschwindigkeiten von Wasserstoff anzupassen, etwa bei Ventilen, Einspritzsystemen oder Dichtkonzepten. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die langfristige Relevanz des Wasserstoffverbrennungsmotors derzeit weniger robust eingeschätzt werden kann als die der anderen emissionsfreien Antriebstechnologien.

Das Thermomanagement stellt auf Subkomponenten- und Komponentenebene ein besonderes Chancenfeld dar, da sich Kostenanteil und technischer Bedarf gegenüber dem konventionellen Antriebsstrang deutlich in Richtung ZET verschieben, insbesondere beim FCET. Auf Komponentenebene wird die Entwicklung integrierter Thermomanagementkonzepte

in enger Zusammenarbeit mit den Herstellern der Nutzfahrzeuge ein wichtiges Zukunftsfeld sein. Auf Subkomponentenebene gewinnen der verbesserte Wärmeübergang und die gezielte Gestaltung von Kühlstrukturen an Bedeutung. Zukunftsweisende Konzepte umfassen beispielsweise die Kühlung des Elektromotors über Hohlleiter, die Optimierung von Kühlplatten sowie Immersionskühlkonzepte.

Die Entwicklung von Natrium-Ionen-Batterien ist derzeit Teil der anwendungsnahen Forschung. Ihre spätere Einführung in die industrielle Praxis verspricht Kostensenkungen und geringere Anforderungen an das Thermomanagement. Entsprechende Entwicklungsaktivitäten können bestehende Batteriewertschöpfung sinnvoll ergänzen.

Kompetenzen in der elektrischen Isolation lassen sich gut auf die Produktion von Elektromotoren übertragen, da dort eine zuverlässige Trennung und Absicherung elektrischer Subkomponenten zentral ist. Vorhandenes Know-how aus der Hochvoltisolation kann genutzt werden, um Qualität und Prozesssicherheit in der Fertigung zu erhöhen. Unternehmen können diese Transferkompetenz nutzen, um schneller in eine skalierbare Wertschöpfung rund um Elektromotoren einzusteigen.

Das Recycling von Komponenten dient dazu, den Ressourceneinsatz zu reduzieren und dadurch Kosten und Abhängigkeiten von kritischen Rohstofflieferanten zu senken. Bestehende Kompetenzen im Recycling müssen gezielt in Richtung der Extraktion Seltener Erden sowie der Trennung und Verwertung von Metallen weiterentwickelt werden. Insgesamt ist der Forschungs- und Entwicklungsbereich der Ressourcenreduktion von hoher Relevanz, da er sowohl Kostenvorteile als auch resiliente Lieferketten ermöglicht. Besonders wichtig ist dies bei der Fertigung von MEA und bei PVD-Beschichtungen von Bipolarplatten.

Im Rahmen der Forschung an Elektromotoren sind fremderregte Synchronmaschinen auch mit Blick auf die Reduktion rohstoffbedingter Abhängigkeiten zentral. Darüber hinaus stellen Axialflussmotoren aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte ein relevanter werdendes Forschungsfeld dar, das mittel- bis langfristig neue Geschäftsfelder eröffnen kann. Beschichtungskompetenzen werden neben der MEA- und Bipolarplattenfertigung insbesondere für die Produktion von Kathoden- und Anodenmaterialien bedeutsam. Die automatisierte und präzise Auslegung dieser Beschichtungsprozesse ist eine komplexe Aufgabe, die weitere Forschung und Pilotierung erfordert.

Forschungskapazitäten werden in der Zellfertigung insgesamt weiterhin notwendig sein, um stabile Prozesse zu gewährleisten und hochwertige Zellen reproduzierbar herstellen zu können. Festkörperbatterien sind ein weiteres Entwicklungsfeld mit erheblichem wirtschaftlichem Potenzial. Der Abstand zur industriellen Serienreife ist derzeit jedoch noch groß, so dass hier vor allem vorwettbewerbliche Forschung und Demonstration im Vordergrund steht.

Qualifizierung und Kooperationen

Die Qualifizierung und Rekrutierung kompetenter Mitarbeitender sind ein zentraler Hebel, um technologische Engpässe in Entwicklung, Produktion und Industrialisierung zu schließen. Erforderlich sind passgenaue Weiterbildungsangebote entlang neuer Schlüsselprofile wie Batterie, Leistungselektronik, Software, Datenkompetenz und automatisierte Prüfung, idealerweise in Form dualer Formate, Zertifikatskurse und praxisnaher Trainings in Laboren und Demonstrationslinien.

Parallel sollten Unternehmen ihre Rekrutierung durch schnellere Einstellprozesse, internationale Talentgewinnung, Kooperationen mit Hochschulen sowie klare Karrierepfade und attraktive Rahmenbedingungen stärken, damit Know-how dauerhaft aufgebaut und gehalten werden kann.

Zusammenfassend steht auf Subkomponentenebene die fachlich tiefe Entwicklung einzelner Schlüsselkomponenten im Vordergrund. Da hierfür spezialisiertes Wissen und hohe Entwicklungstiefe erforderlich sind, eignet sich diese Ebene besonders für Forschungsk Kooperationen zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, um Wissen, Risiko und Entwicklungsaufwand zu teilen und zu reduzieren. Die Modulentwicklung ist demgegenüber stark vom Zusammenspiel mehrerer Komponenten geprägt und sollte eng mit den Herstellern der Nutzfahrzeuge erfolgen, da hier Integrationsanforderungen, Schnittstellen und Industrialisierungsvorgaben früh abgestimmt werden müssen.

	Kompetenz	Entwicklungsfeld	Komplexität	Komponenten
Übergreifend	Qualitätssicherung	End-of-Line-Prüfung	■	Komponentenübergreifend
	Anlagenbau	Automatisierung und Digitalisierung der Produktion	■	Komponentenübergreifend
	Anlagenbau	Beschichtung und Trocknung	■	Brennstoffzelle und Batterie
	Handel	Zweitmarkt macht Anschaffung attraktiver	■	Nutzfahrzeuge
	Qualitätssicherung	Inline-Prüfung	■	Komponentenübergreifend
System	Gießen, Zerspanen, Umformen	Gehäuse und Strukturbauteile	■	Komponentenübergreifend
	Gießen, Zerspanen, Umformen	Cell2Pack und Cell2Module, Cell2Chassis	■	Batterie
	Spezialisierte Produktionsumgebung	Reinraum	■	Batterie, Brennstoffzelle, Leistungselektronik
	Verbrennerfertigung	H2-ICE	■	Verbrennungsmotor
	Thermomanagement	Entwicklung Kompakter Thermomanagement-Module	■	System
(Sub-) Komponente	Forschung	Natrium-Ionen-Batterien	■	Batterie
	Thermomanagement	Komponentenspezifisches Thermomanagement	■	Komponentenübergreifend
	Elektrische Isolation	Isolation E-Motor	■	E-Motor und Leistungselektronik
	Recycling	Komponentenübergreifendes Recycling	■	Komponentenübergreifend
	Forschung	Fremderregte Synchronmaschinen	■	E-Motor
	Beschichten und Trocknen	MEA-Fertigung	■	Brennstoffzelle
	Beschichtungskompetenz	Kathode und Anode	■	Batterie
	Beschichtungskompetenz	PVD-Beschichtung Bipolarplatten	■	Brennstoffzelle
	Forschung	Reduktion des Ressourceneinsatzes	■	Komponentenübergreifend
	Forschung	Zellfertigung	■	Batterie
	Forschung	Halbleiterfertigung	■	Leistungselektronik
	Forschung	Axialflussmotoren	■	E-Motor
	Forschung	Festkörperbatterien	■	Batterie

Tabelle 7: Handlungsempfehlungen und Entwicklungsfelder zur Sicherung der lokalen Wertschöpfung

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Unterschiede in den Entwicklungsfeldern

Die Entwicklungsfelder unterscheiden sich vor allem darin, welches Ziel mit dem Kompetenzaufbau verfolgt wird und welcher Zeithorizont dahintersteht: Geht es um das Schließen konkreter Lücken, um die Vorbereitung auf mögliche Technologiesprünge oder um die konsequente Weiterentwicklung bereits bestehender Kompetenzen?

Bei **schwächenausgleichenden** Maßnahmen geht es darum, vorhandene Defizite abzubauen und gezielt in Forschung und Entwicklung der entsprechenden Technologien einzusteigen. Das betrifft sowohl Komponentenkompetenzen als auch System-Know-how und die dazugehörigen übergreifenden Fähigkeiten. Ziel ist, künftig an der Wirtschaftlichkeit dieser Technologien teilzuhaben und das damit verbundene Wachstumspotenzial zu erschließen, statt dauerhaft von externen Entwicklungen abhängig zu bleiben.

Die **Risikoabfederung** beschreibt die Erkundung disruptiver Technologien, um Sprunginnovationen zu ermöglichen und relevante Entwicklungen nicht zu verpassen. Hier steht weniger die kurzfristige Verwertung im Vordergrund, sondern der Aufbau von Orientierungs- und Umsetzungskompetenz über Komponenten, Systeme und umfassende Bereiche hinweg, damit ein Standort nicht „abgehängt“ wird, wenn sich technologische Pfade unerwartet verschieben. Zusätzlich zur Absicherung gegenüber der Gefahr, abgehängt zu werden, liegt hier das Potenzial, einen großen Technologiesprung zu erreichen.

Der **Stärkenausbau** adressiert das Weiterentwickeln bestehender Kompetenzen, um weiterhin mit bekannten Fähigkeiten Wertschöpfung zu erzielen. Diese Stabilität ist wichtig, um laufende Aktivitäten zu finanzieren und damit auch die Voraussetzung zu schaffen, Schwächen auszugleichen und Risiken abzufedern.

Aus der Priorisierung ergibt sich eine zeitliche Umsetzungslogik. Kurzfristig stehen Maßnahmen im Vordergrund, die akute Schwächen ausgleichen und Investitionsrisiken senken, insbesondere der Ausbau der H₂- und Ladeinfrastruktur, ein gesicherter Energiezugang sowie verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen und Genehmigungsprozesse. Mittelfristig rücken Skalierung und Industrialisierung in den Fokus, etwa über Pilotlinien, Test- und Validierungsinfrastruktur, Automatisierung und standardisierte Qualitätsnachweise, um Kosten zu senken und robuste Serienprozesse zu erreichen.

Langfristig entscheiden Kompetenzaufbau, Qualifizierung und Rekrutierung sowie der Ausbau regionaler Wertschöpfung und Lieferketten darüber, wie nachhaltig sich die industrielle Positionierung absichert.

Die Rolle der Unternehmen

Unternehmen müssen die Transformation aktiv mitgestalten, um sie ökonomisch sinnvoll zu durchlaufen. Die dafür notwendigen Entscheidungen sind stark von Größe und Position in der Wertschöpfungskette abhängig und lassen sich nur begrenzt verallgemeinern.

Im Kern steht eine Sequenz aus drei Schritten: Erstens muss jedes Unternehmen festlegen, welche Technologien und Wertschöpfungsumfänge im jeweiligen Zeithorizont realistisch erschließbar sind und diese Portfolioentscheidung explizit an den in Kapitel 5.2 abgeleiteten Kompetenzbedarfen ausrichten. Zweitens sind daraus abgeleitet Investitionen in Anlagen, Fabrikumgebung und Qualifizierung zu tätigen, um die erforderlichen Kompetenzen und Kapazitäten aufzubauen. Drittens entscheidet die Fähigkeit zur Industrialisierung und Skalierung über die Wirtschaftlichkeit: Zukünftig wertschöpfungsstarke Produkte erfordern robustes Prozessmanagement, enge Qualitätsfenster, Rückverfolgbarkeit und reproduzierbare Serienprozesse. Insbesondere die Batteriefertigung wird typischerweise erst bei hoher Skalierung wirtschaftlich. Bei der Erschließung neuer Geschäftsfelder spielt die Skalierung und Automatisierung stets eine große Rolle, da die Personalkosten am Standort Baden-Württemberg hoch sind, sodass nicht jeder Prozessschritt wirtschaftlich in Baden-Württemberg verordnet sein kann. Nur stark spezialisierte Kompetenzen oder automatisierbare Prozesse können in Baden-Württemberg bestehen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Rollenprofile:

KMU sollten die Transformation über zulieferfähige Produkte und klar abgrenzbare Prozessbausteine gestalten. Das gelingt am besten dort, wo vorhandene Querschnittskompetenzen (z. B. Gießen, Zerspanen, Umformen, Fügen, Montage, Prüftechnik) auf neue Komponenten übertragbar sind und wo sie in großskalierte Systeme „hineinliefern“ können, ohne selbst Gigaskalierung tragen zu müssen. Zusätzlich entsteht für KMU ein attraktives Eintrittsfenster über Anlagen- und Prozessentwicklung (z. B. Mischen/Dosieren, Füge- und Prüfprozesse), mit dem sie an der Wertschöpfung großskaliger Produktionen partizipieren können.

Tier-1 sollten insbesondere Subsysteme industrialisieren, in denen Skalierung über mehrere OEMs möglich ist (Module, Integration, Test/Validierung, teils Automatisierung). Hier liegt der Hebel in der schnellen Serienreife, der Standardisierung von Schnittstellen und der Fähigkeit, Variantenkomplexität beherrschbar zu halten.

OEMs müssen die Transformation über Plattform- und Integrationsentscheidungen steuern: Sie definieren Zielarchitekturen, Fertigungstiefen, Industrialisierungsfahrpläne und bündeln Zulieferkompetenzen zu serienfähigen Systemen. Entsprechend sollten OEMs dort investieren, wo große Stückzahlen, Systemverantwortung und Koordination der Lieferkette Skalierungsvorteile erzeugen und zugleich Partnerschaften dort setzen, wo die Kompetenzdeckung gering ist und Markteintrittsbarrieren hoch sind.

Die passende Transformationsstrategie sollte jedes Unternehmen konsequent an Größe, Ressourcen und Rollenverständnis ausrichten. Entscheidend ist nicht, jede Technologie zu beherrschen, sondern gezielt die künftig relevanten Kompetenzen aufzubauen, die zur eigenen Kapital- und Umsetzungskraft passen und sich klar in Wertschöpfung übersetzen lassen.

Gleichzeitig erhöht die aktive Beteiligung an Forschungsvorhaben und der enge Austausch mit regionalen Partnern die Trefferquote: So lassen sich Anforderungen früh verstehen, Schnittstellen abstimmen und Entwicklungsrisiken teilen. So kann die Branche gemeinsam an einer übergeordneten Leit-

linie mitwirken, die OEMs und Staat durch Standards, Förderprogramme, Qualifizierung und Infrastruktur konkretisieren. Damit werden Investitionen besser plan- und skalierbar.

Voraussetzungen für die Transformation der Nutzfahrzeugbranche

Die bisher diskutierten wirtschaftlichen Potenziale ergeben sich nur, wenn ein Hochlauf der ZET gewährleistet ist. Erst wenn große Stückzahlen produziert werden, können sich Investitionen amortisieren und Skaleneffekte eintreten. Daher wird nun beschrieben, für wen sich bereits heute ein Betrieb von ZET lohnt und anschließend, in welcher Verantwortung die Gesetzgeber stehen, um das Risiko für eine Investition zu reduzieren.

Investitionen in Elektrifizierung und Wasserstoff sind vor allem dann wirtschaftlich attraktiv, wenn die jeweiligen Energiekosten niedrig sind und verlässlich zur Verfügung stehen. Unternehmen mit bestehendem Zugang zu Netzstrom sollten daher kurzfristig prüfen, ob elektrifizierte Antriebe für die eigenen Einsätze geeignet sind. Ist kein ausreichender Anschluss vorhanden, empfiehlt sich eine Betriebskostenrechnung, die den Ausbau eines Netzanschlusses und/oder ein eigenes PV-System (gegebenenfalls kombiniert mit Speicher) den erwarteten Energie- und Wartungskosten gegenüberstellt.

Elektrifizierung lohnt sich bereits heute in vielen Fällen im Liefer- und Verteilerverkehr und gewinnt zunehmend auch

KMU	Tier-1	OEM
<ul style="list-style-type: none"> ■ Fokus auf zulieferfähige Produkte und klar trennbare Prozessbausteine ■ Querschnittskompetenzen auf neue Komponenten übertragen ■ Große Produktionsanlagen beliefern, ohne diese selbst aufzubauen ■ Einstieg über Anlagen- und Prozessentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fokus auf Subsysteme mit Multi-OEM-Skalierung ■ Schnelle Serienreife und Industrialisierung als Haupthebel ■ Schnittstellen standardisieren, Variantenkomplexität beherrschen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fokus auf Plattform und Integration (Zielarchitektur, Fertigungstiefe, Roadmap) ■ Investieren, wo Stückzahlen und Koordination Skalenvorteile bringen ■ Partnerschaften bei Kompetenzlücken/hohen Eintrittsbarrieren; Strategien klar kommunizieren und Standardisierung ermöglichen

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Abbildung 49: Transformationsherausforderungen nach Unternehmensgröße

für den Fernverkehr an Relevanz. Eine Voraussetzung dafür ist die Abdeckung der individuellen Route durch Ladeinfrastruktur (unter Berücksichtigung der notwendigen Standzeiten). Wasserstoffantriebe können insbesondere dort sinnvoll sein, wo ein günstiger und planbarer Zugang zu Wasserstoff besteht und die Versorgung entlang der Routen abgesichert ist. Ohne diese Voraussetzung ist ein wirtschaftlicher Betrieb von Wasserstofffahrzeugen aktuell unrealistisch.

Wichtig ist außerdem, dass die Bewertung immer unternehmensspezifisch erfolgen muss. Neben harten Kriterien wirken auch weiche Faktoren wie Einsatzflexibilität, Verfügbarkeit von Lade-/Tankpunkten, Planbarkeit von Touren, Restwert Risiken, Förderkulissen, CO₂-Ziele und Kundenanforderungen. Einen allgemeingültig besten Antrieb gibt es daher nicht. Der Handlungsbedarf liegt in einer strukturierten Wirtschaftlichkeitsprüfung, die auch durch Forschungsinstitutionen und Beratungsfirmen durchgeführt werden kann.

6.2 Anforderungen an die lokalen, nationalen und europäischen Rahmenbedingungen

Die Transformation eines Unternehmens und die Erschließung neuer Geschäftsfelder sind mit erheblichen wirtschaftlichen Risiken verbunden. Gelingt es jedoch, diese Risiken zu begrenzen, steigt die Wahrscheinlichkeit eines flächendeckenden Einstiegs in die Produktion der beschriebenen Zukunftstechnologien.

Genau darin liegt auch eine Chance. Technologische und industrielle Entwicklung entsteht nicht zufällig, sondern dort, wo verlässliche Rahmenbedingungen vorhanden sind. Regionen, die Planungssicherheit schaffen, etwa durch geeignete Infrastruktur, Zugang zu Kapital, qualifizierte Fachkräfte, wettbewerbsfähige Energiepreise, klare Regulierung und wirksame Förder- beziehungsweise Beschaffungsprogramme, senken die Eintrittsbarrieren für Unternehmen und beschleunigen Investitionsentscheidungen.

Wo diese Rahmenbedingungen aufgebaut werden, entstehen Cluster aus Zulieferern, Forschungseinrichtungen, Pilotanlagen und Serienproduktion. Solche Cluster ziehen Entwicklungs- sowie Produktionsexpertinnen und -experten an, weil sie attraktive Karrierepfade, Wissensaustausch und langfristige Perspektiven bieten. Das verstärkt einen positiven Kreislauf. Mehr Talente und Unternehmen erhöhen Innovationsgeschwindigkeit und Skalierung, was wiederum die

Standortattraktivität weiter steigert. Im Folgenden werden daher Engpässe und Herausforderungen für den Standort Baden-Württemberg aufgezeigt und ein Vorschlag unterbreitet, wie Rahmenbedingungen die Attraktivität des Standortes erhöhen können.

In der Abbildung 50 sind die Handlungsempfehlungen zusammengefasst, welche an die Politik gerichtet sind und deren Notwendigkeit im Folgenden erläutert wird.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Erstens zeigt sich in der industriellen Wertschöpfung ein zentraler Engpass in der fehlenden Partizipation an Schlüsseltechnologien. Um kritische Kompetenzlücken zu schließen, braucht es eine gezielte Förderung von Robotik, KI und automatisierter Prüfung.

Ein weiterer Engpass besteht darin, dass der Technologievorsprung durch die Elektrifizierung rückläufig ist. Batterieproduktion, automatisierte Produktion von E-Maschinen und Leistungselektronik sind zentrale Hebel für neue Wertschöpfung und Exportfähigkeit. Da der Übergang vom Prototyp zur Serie besonders kapitalintensiv und fehleranfällig ist, sollte

die Risikoabsicherung durch Förderinstrumente wie Pilotlinien, Industrialisierungsprogramme und die Absicherung von Anlaufkosten gestärkt werden. Ergänzend braucht es Unterstützung bei Standardisierung, Qualifizierung und dem Aufbau resilienter Lieferketten, um Abhängigkeiten zu reduzieren und die Skalierung in Europa zu beschleunigen.

Der Ausbau von Wasserstoff-Tankstellen und einer leistungsfähigen und an Nutzfahrzeuge angepassten Ladeinfrastruktur sowie die Absicherung des Betriebs senken die Einstiegshürden für die Betreiber der Nutzfahrzeuge deutlich. Eine Förderung ist hier besonders wirksam, weil sie unmittelbar

die Nutzbarkeit im Alltag verbessert, Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur auslöst und dadurch den Markthochlauf sowie Skaleneffekte entlang der Industrie beschleunigt.

Gleichzeitig bleibt der Transfer exzellenter Forschung in die Industrie hinter den Möglichkeiten zurück. Plattformen wie Konferenzen, Messen, Reallabore und offene Testfelder sollten systematisch ausgebaut werden, damit Forschungsergebnisse schneller sichtbar, vergleichbar und anwendungsnah werden. Besonders wirksam sind Formate, die echte Industriebedarfe adressieren, etwa Use-Case-Challenges, gemeinsame Roadmaps und Vorserien-Demonstratoren, statt Austausch nur über Technologien zu fördern.

Ein zusätzlicher Engpass betrifft die fehlende Kapazität vieler KMU, Technologievorausschau professionell zu betreiben. Hierfür sollten EU- und Landesprogramme aufgesetzt werden, die KMU methodisch und finanziell befähigen, Technologieradar, Szenarien und Transformationspfade aufzubauen. Niedrigschwellige Angebote wie Branchenscouts, standardisierte Tools, geförderte Beratungsbudgets und gemeinsame Roadmapping-Workshops mit Forschungseinrichtungen sowie OEMs und Tier-1 können die Umsetzung erleichtern. Ziel ist, dass KMU frühzeitig Investitionen, Qualifizierung und Partnerschaften planen können, anstatt erst zu reagieren, wenn Märkte und Standards bereits gesetzt sind.

Im Bereich Wasserstoff zeigt sich ein Spannungsfeld, weil Brennstoffzellensysteme sehr teuer sind, der Betrieb von H₂-Fahrzeugen jedoch gerade für die Langstrecke attraktiv sein kann. Eine sinnvolle Brücke kann darin liegen, den H₂-ICE als Transfertechnologie zu positionieren, um schnelle Markteinführung, frühe Stückzahlen und Praxisdaten zu ermöglichen, die den Hochlauf der Wasserstoffinfrastruktur wirtschaftlicher machen. Parallel sollte ein gezielter Ramp-up der Brennstoffzellentechnologie unterstützt werden, damit Skaleneffekte, Lernkurven und Zulieferketten die Kosten senken und der Übergang in größere Volumina planbar wird.

Der Weg, Innovationen aus Forschungseinrichtungen zu extrahieren, ist noch nicht ausreichend ausgebaut. Gründung und Skalierung müssen erleichtert werden, damit Know-how und Wertschöpfung in der Region bleiben, wozu schnellere Verfahren, klare Ansprechpartner und weniger bürokratische Hürden beitragen. Verlässliche Rahmenbedingungen sind ebenso wichtig, etwa der Zugang zu Wachstumskapital, verfügbare Test- und Produktionsflächen sowie Unterstützung bei Regulierung und Zertifizierung. Zusätzlich sollten Grün-

dungsnetzwerke und Scale-up-Programme gestärkt werden, damit Unternehmen schneller skalieren und wachsen können.

07

Schlussfolgerungen und Ausblick

07

Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Studie wird gezeigt, dass die Transformation des Nutzfahrzeugmarkts in Baden-Württemberg sowohl technologisch als auch ökonomisch einen zentralen Aspekt für Klimaschutz sowie die industrielle Wettbewerbsfähigkeit und die regionale Wertschöpfung darstellt.

Erstens zeigt die Szenario- und Kostenanalyse eindeutig, dass der konventionelle Verbrennungsmotor im schweren Nutzfahrzeugverkehr strukturell an Bedeutung verliert und durch batterieelektrische sowie brennstoffzellenbasierte Antriebe ersetzt wird.

Zusätzlich zu den techno-ökonomischen Ergebnissen wird in Kapitel 5 verdeutlicht, dass sich die Transformationsdynamik in Baden-Württemberg vor allem als Verschiebung der wertschöpfungsintensiven Bauteile entlang der Antriebsstränge manifestiert. Sie wandert vom Motor, dem Getriebe und der Abgasnachbehandlung hin zu Batterie-, Brennstoffzellen- und Wasserstoffsystemen. Die Stücklisten- und Kostenstrukturvergleiche machen dabei sichtbar, dass es nicht nur zu einem Austausch einzelner Komponenten kommt, sondern zu einer grundsätzlichen Reallokation industrieller Wertschöpfung: Beim batterieelektrischen Antrieb verschiebt sich der Kostenschwerpunkt in Richtung Traktionsbatterie, beim brennstoffzellen-elektrischen Antrieb in Richtung Brennstoffzellenstack, Systemperipherie und Wasserstoffspeicher, während beim Diesel die klassischen Antriebsstrang- und Abgasstrukturen dominieren. Daraus folgt, dass regionale Teilhabe weniger an der Endmontage hängt, sondern daran, ob Baden-Württemberg in den neuen, kapital- und prozessintensiven Kernsystemen (Zelle/Pack, Stack/BoP sowie Wasserstoffspeicher und -peripherie) skalierbare Industriekompetenzen, Lieferketten und Serienprozesse aufbauen beziehungsweise ansiedeln kann.

Zweitens wird deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit emissionsfreier Nutzfahrzeuge weniger durch einzelne Fahrzeugparameter bestimmt wird als durch systemische Rahmenbedin-

gungen. Energiekosten und nutzungsseitige Verfügbarkeit wirken als dominierende Kostentreiber über alle betrachteten Szenarien hinweg. Daraus folgt, dass Maßnahmen zur Sicherung kostengünstiger Energiepfade sowie zum Ausbau von Lade- und Wasserstoffinfrastruktur eine höhere Hebelwirkung besitzen als isolierte Kaufanreize. Der Markthochlauf von ZET ist damit in hohem Maße von der Verfügbarkeit verlässlicher Energie- und Infrastrukturangebote abhängig.

Drittens ist die erfolgreiche Transformation wesentlich eine Frage der Industrialisierungsfähigkeit. Technologische Machbarkeit allein reicht nicht aus, um Wettbewerbsfähigkeit zu erreichen. Entscheidend sind skalierbare, automatisierte und qualitätsstabile Fertigungsprozesse sowie robuste Lieferketten. Besonders in Bereichen wie Batterie, Leistungselektronik und Brennstoffzellensystemen entscheidet die Fähigkeit zur schnellen Überführung in Serienprozesse über Kostenentwicklung und Marktposition.

Viertens verfügt Baden-Württemberg über breite Ausgangskompetenzen in Fertigungstechnik, Maschinenbau, Systemintegration und Qualitätssicherung, die grundsätzlich auf ZET-Komponenten übertragbar sind. Gleichzeitig bestehen substanzielle Lücken in wertschöpfungsintensiven Stufen wie Batteriezellfertigung, Halbleiterproduktion sowie Brennstoffzellen-Fertigung. Die regionale Transformationsfähigkeit hängt daher davon ab, ob bestehende Stärken gezielt weiterentwickelt und ausgewählte neue Kompetenzfelder aufgebaut werden.

Fünftens kommt Kooperationen eine zentrale Bedeutung zu. Aufgrund hoher Investitionsvolumina, technologischer Unsicherheiten und Skalierungserfordernisse lassen sich viele Entwicklungsschritte nicht einzelbetrieblich abbilden. Verbundforschung, Konsortien, gemeinsame Pilotlinien und Standardisierungsinitiativen sind notwendige Instrumente, um Entwicklungsrisiken zu teilen und Industrialisierung zu beschleunigen.

Sechstens ist Qualifizierung eine Grundvoraussetzung für regionale Wertschöpfung. Der technologische Hochlauf von ZET erfordert Fachkräfte in Elektrifizierung, Batterie, Leistungselektronik, Brennstoffzelle, Software und Diagnose. Ohne systematische Weiterbildungs- und Umschulungsangebote sowie ergänzende Rekrutierung aus dem In- und Ausland drohen Engpässe, die unabhängig von Fördermitteln oder Infrastrukturinvestitionen wirksam werden.

Siebtens ergibt sich eine klare Arbeitsteilung zwischen Unternehmen und Staat. Unternehmen sind für Technologie- und Portfolioentscheidungen, Investitionen und Industrialisierung verantwortlich. Der Staat wirkt als Regelsetzer und Enabler, indem er verlässliche Rahmenbedingungen, Infrastruktur und risikoreduzierende Instrumente bereitstellt. Die Politik und die Unternehmen sollten eng zusammenarbeiten, um einen vielversprechenden Pfad der Technologietransformation zu definieren und zu beschreiten. Gleichzeitig sollten beide Seiten passende Rahmenbedingungen und Umsetzungsinstrumente abstimmen, etwa bei Infrastruktur, Energiepreisen, Regulierung, Standardisierung sowie der Förderung von Pilotierung und Industrialisierung, damit Innovationen schneller in wettbewerbsfähige Serienprozesse übergehen. Nur so lassen sich Risiken teilen, Skalierung beschleunigen und die industrielle Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern.

Die in dieser Studie abgeleiteten Handlungsempfehlungen adressieren sowohl kurzfristige Transformationsbefähigung als auch langfristige Strukturpolitik. Prioritär sind der beschleunigte Ausbau der Lade- und Wasserstoffinfrastruktur, die Sicherung kostengünstiger Energiepfade sowie die Skalierung der Produktion emissionsfreier Fahrzeuge und Kernkomponenten. Auf der Ebene der Komponenten kann Baden-Württemberg an der Wertschöpfung partizipieren, indem die benötigten Maschinen geliefert werden, die Prozesse ausreichend automatisiert werden oder ein technologischer Vorsprung durch die Erforschung vielversprechender Technologien gewährleistet wird. Nur durch die parallele Gestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen, industriepolitischer Förderung und unternehmerischer Investitionsentscheidungen kann die Antriebswende wirtschaftlich tragfähig und regional wertschöpfend gestaltet werden. Die kommenden Jahre werden entscheidend sein, um Baden-Württemberg als Leitregion für nachhaltige Nutzfahrzeugmobilität zu positionieren und die industrielle Basis für die Mobilität der Zukunft zu sichern.

08

Anhang

08

Anhang

8.1 Aufbau alternativer Antriebskonzepte und der notwendigen Infrastruktur

Alle Antriebskonzepte benötigen, wie in Kap. 2 der Strukturstudie BW¹ beschrieben, mindestens einen Energiespeicher sowie einen Energiewandler. Die Integration weiterer Speicher oder Wandler kann Vorteile bergen, ist jedoch auch immer mit Mehrkosten und Aufwänden verbunden. Die Speicher mit ihren entsprechenden Energieträgern sind der Dieseltank (Diesel), der Wasserstofftank (Wasserstoff) und die Batterie (Elektrische Energie). Zu den Wandlern gehören der Verbrennungsmotor, die Brennstoffzelle und der Elektromotor. Diese Komponenten lassen sich zu den folgenden Antriebskonzepten kombinieren.

Verbrennungsmotorischer Antriebsstrang

Im Folgenden werden die Komponenten und deren Zusammenwirken im Antriebsstrang von konventionellen Nutzfahrzeugen der Klassen N2/N3 erläutert. Der schematische Aufbau des Dieselantriebs ist in Abbildung 51 dargestellt.

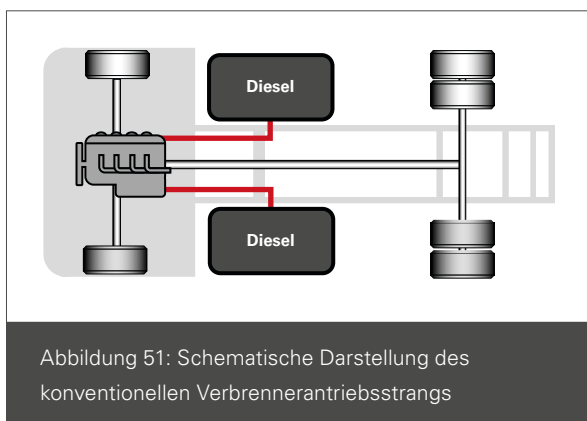


Abbildung 51: Schematische Darstellung des konventionellen Verbrennerantriebsstrangs

Zu sehen ist der Antriebsstrang bestehend aus den Antriebsachsen, den Dieseltanks und dem Verbrennungsmotor. Weitere wichtige Komponenten sind im Wesentlichen das Ansaugsystem mit Ladeluftkühlung, das Abgassystem mit Abgasnachbehandlung sowie das Kraftübertragungssystem aus Kupplung, Getriebe und Kardanwelle. Ziel dieser Antriebsform ist es, die chemisch gebundene Energie des Dieselmotors in mechanische Antriebsarbeit umzuwandeln. Für den Betrieb steht eine weitgehend ausgebaute Infrastruktur mit einem dichten Netz an Tankstellen für Diesel und das Abgasnachbehandlungsmittel AdBlue zur Verfügung.

Im Zentrum dieses Antriebssystems steht der Dieselmotor als Energiewandler. Schwere Nutzfahrzeuge verwenden hauptsächlich wassergekühlte Viertakt-Hubkolbenmotoren mit Selbstzündung, bei denen der Kraftstoff durch die hohe Verdichtung der Ansaugluft gezündet wird.² Heute dominieren Sechszylinder-Reihen-Dieselmotoren in Fahrzeugen der Klassen N2/N3. Zur Leistungssteigerung und Effizienzverbesserung sind diese in der Regel turboaufgeladen. Ein Abgasturbo-lader nutzt dabei die im Abgas enthaltene Energie, um die Ansaugluft zu verdichten. In Kombination mit einem Ladeluftkühler wird die Temperatur der verdichteten Luft gesenkt, wodurch ihre Dichte und damit die verfügbare Sauerstoffmasse für die Verbrennung steigt.³ Insgesamt zeichnen sich Dieselmotoren durch den höchsten erreichbaren Wirkungsgrad unter den Verbrennungsmotoren aus. Moderne Dieselmotoren erreichen thermische Spitzenwirkungsgrade von rund 45-50%⁴, was deutlich über den Werten von Ottomotoren ($\leq 35\%$) liegt.⁵ Entsprechend kann nur ein Anteil der im Kraftstoff rechnerisch enthaltenen Energie in Vortrieb umgesetzt werden. Neben dem Motor selbst spielt das Abgasnachbehandlungssystem eine

1 | e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg 2023, 17 ff.
 2 | van Basshuysen und Schäfer 2017, 709 ff.
 3 | Zamboni 2019.
 4 | van Basshuysen und Schäfer 2017, S. 755
 5 | LEIFphysik 2023.

zentrale Rolle. Seit Einführung der Abgasnorm Euro VI¹ für schwere Nutzfahrzeuge kommen umfangreiche Abgasreinigungskomponenten zum Einsatz, um die gesetzlichen Grenzwerte für Stickoxide, Partikel und weitere Schadstoffe einzuhalten. Die vom Motor erzeugten Drehmomente und Leistungen werden über das Kraftübertragungssystem auf die Räder geleitet. In schweren Lkw werden hierfür typischerweise mehrstufige Schaltgetriebe eingesetzt, die heute überwiegend als automatisierte Schaltgetriebe (AMT) ausgeführt sind, um den Motor über einen breiten Einsatzbereich im verbrauchsgünstigen Drehzahlfenster zu betreiben². Vom Getriebe wird die Kraft von der Kardanwelle durch das Differential auf die Antriebsachsen übertragen, wo Achsgetriebe das Drehmoment für den Fahrbetrieb anpassen. Für die Kraftstoffversorgung sind ein oder mehrere Dieseltanks als Energiespeicher am Fahrzeug verbaut, die je nach Reichweitenanforderung typischerweise Gesamtvolumina von mehreren hundert Litern fassen. Ein 40-Tonnen Fernverkehrs-Lkw besitzt häufig 400 bis 800 Liter Dieseltankkapazität. Damit können je nach Beladung 1.000km bis 3.000 km zurückgelegt werden.

Die Infrastruktur für Dieselkraftstoff ist bereits flächendeckend etabliert: Entlang der Transitrouten und in allen Regionen existiert ein enges Netz an Tankstellen, die Diesel anbieten. Die Betankung eines Lkw erfolgt mit Hochleistungs-Zapfanlagen innerhalb weniger Minuten, was minimale Standzeiten gewährleistet. Zusätzlich muss der AdBlue-Tank regelmäßig befüllt werden. Im Vergleich zum typischen Dieserverbrauch im Transitverkehr (0,27 kg/km) liegt der AdBlue-Verbrauch bei ca. 0,01 kg/km.³ AdBlue ist jedoch ebenfalls an praktisch allen Lkw-Tankstellen verfügbar und wird dort an separaten Zapfsäulen bereitgestellt. Weitere Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte, etwa durch die geplante Euro-VII-Norm, erfordern daher vor allem Anpassungen in Motor- und Abgastechnik, jedoch keine grundlegenden neuen Infrastrukturinvestitionen.

Batterieelektrischer Antriebsstrang

Im Folgenden werden die Komponenten und deren Zusammenwirken im Antriebsstrang von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen erläutert. Der batterieelektrische Antrieb, wie in Abbildung 52 dargestellt, umfasst im Wesentlichen die Traktionsbatterie, das Batteriemanagementsystem (BMS), den Elektromotor, die Leistungselektronik (wie den Inverter), das Kühlsystem (Temperaturmanagement), das Ladegerät an Bord (On-Board Charger) sowie ein Kraftübertragungssystem.

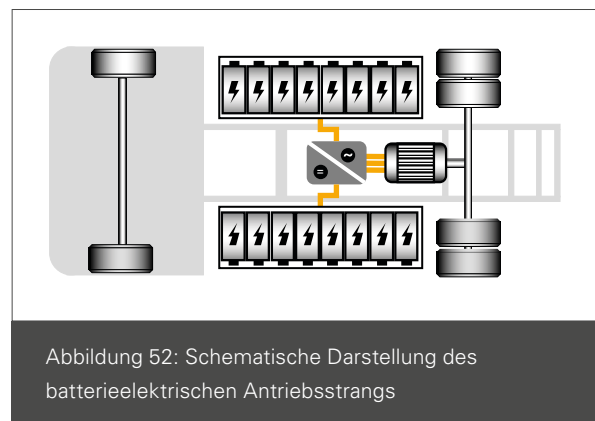


Abbildung 52: Schematische Darstellung des batterieelektrischen Antriebsstrangs

Ziel dieser Antriebsform ist es, die in der Batterie gespeicherte elektrische Energie in mechanische Antriebsleistung umzuwandeln. Für den Betrieb steht eine sich kontinuierlich entwickelnde Ladeinfrastruktur zur Verfügung, die entlang wichtiger Transportkorridore ausgebaut wird. Das Netz an Ladepunkten und Schnellladeeinrichtungen für Nutzfahrzeuge wächst, befindet sich jedoch weiterhin im Aufbau.

Im Zentrum des batterieelektrischen Antriebssystems steht die Traktionsbatterie als Energiespeicher. Es handelt sich hierbei um ein Hochvoltsystem, das in der Regel aus Lithium-Ionen-Zellen besteht. Diese Zellen sind häufig in Modulen zusammengefasst und werden permanent über das Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht. Das BMS ist für die Sicherheit und Effizienz essenziell, da es den Ladezustand, die Temperatur und die allgemeinen Sicherheitsfunktionen der Batterie regelt. Je nach Anwendung kommen verschiedene Typen von Elektromotoren zum Einsatz. Insbesondere schwere Nutzfahrzeuge verwenden überwiegend wasser- oder ölgekühlte Synchronmaschinen. Diese Motoren zeichnen sich durch ein hohes Drehmoment aus, das bereits bei niedrigen Drehzahlen bereitsteht. Die gespeicherte elektrische Energie wird über die Leistungselektronik anschließend in eine für den Elektromotor geeignete Wechselfrequenz umgewandelt.

1 | Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union.
2 | Hoepke und Breuer 2016, S. 518
3 | Fritz et al. 2022.

nung (AC) umgewandelt. Dabei erreichen moderne Elektromotoren und Leistungselektronik Wirkungsgrade von über 90%¹ im gesamten Drehzahl- und Betriebsbereich. Neben dem Motorbetrieb können Elektromotoren auch als Generatoren fungieren, um Energie beim Bremsen aufzunehmen. Diese Funktion ist bei den schweren Nutzfahrzeugklassen insbesondere bedeutsam, da bei Gefällen und Bremsungen ein Teil der kinetischen Energie rekuperiert werden kann.² Damit kann auch die Funktion des Retarders integriert übernommen werden. Die Energieaufnahme aus dem Stromnetz erfolgt über das Ladegerät. Dabei wird zwischen dem Laden mit Wechselstrom (AC) über ein internes On-Board-Ladegerät (OBC) und dem Schnellladen mit Gleichstrom (DC) unterschieden. Ähnlich wie beim dieselmotorischen Antrieb enthält der elektrische Antrieb ebenfalls Kraftübertragungselemente wie das Getriebe und das Differenzial. Hier gilt die sogenannte e-Achse als moderne und kompakte Systemlösung, da diese Elektromotor, Leistungselektronik und Getriebe in einer platzsparenden und modularen Baugruppe vereint.³

Die aktuelle Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge umfasst öffentliche und private Ladepunkte sowie Depot-Ladelösungen. Hinzu kommen zunehmend Hochleistungs-Schnellladestationen mit Ladeleistungen von bis zu 350 kW und mehr. Zusätzlich wird an Megawatt-Ladesystemen (MCS) gearbeitet (erste Systeme wurden vorgestellt), um die Ladezeiten für Langstrecken-Lkw erheblich zu verkürzen.⁴ Im Vergleich zur konventionellen Dieselloserversorgung ist die elektrische Infrastruktur noch im Aufbau, jedoch werden durch Förderprogramme und Investitionen der Energieversorger wichtige Schritte in Richtung einer flächendeckenden Versorgung unternommen. Diese muss für Lkw deren Größe sowie die Schleppkurven der Trailer berücksichtigen.

Brennstoffzellen-elektrischer Antriebstrang

Im Folgenden werden die Komponenten und ihr Zusammenwirken im Antriebstrang von brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen und Lastkraftwagen (Englisch: Fuel Cell Electric Truck, FCET) dargestellt und erläutert. Der grundlegende Aufbau eines FCET ist in Abbildung 53 dargestellt.

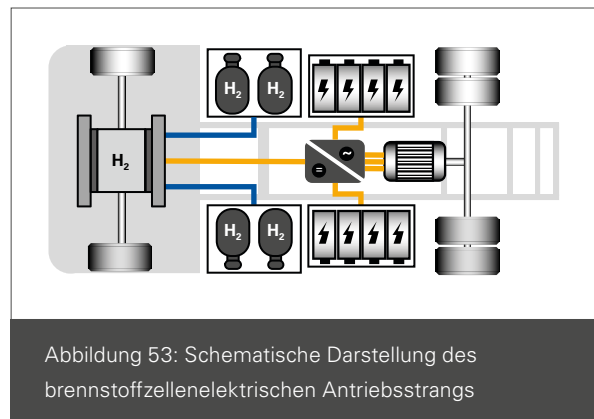


Abbildung 53: Schematische Darstellung des brennstoffzellenelektrischen Antriebstrangs

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

Ein brennstoffzellenelektrischer Antrieb besteht in der Regel aus einem Brennstoffzellensystem, einem oder mehreren Wasserstofftanksystemen, einer Pufferbatterie, der Leistungselektronik und einem elektrischen Antriebstrang bestehend aus Elektromotor und Getriebe. Im Zentrum dieser Antriebsform steht das Brennstoffzellensystem, das die Aufgabe der Energiewandlung von chemisch gebundener Energie in Form von Wasserstoff zu elektrischer Energie erfüllt.⁵ Dabei zeichnet sich die Brennstoffzelle insbesondere durch ihren hohen Wirkungsgrad von bis zu 60% aus und erzeugt als Produkt der Energiewandlung neben Strom ausschließlich Wasserdampf.⁶ Einige Hersteller prognostizieren sogar noch signifikante Steigerungen des Wirkungsgrads in den kommenden Brennstoffzellen-Generationen. Die Bereitstellung des Wasserstoffs erfolgt aus dem Wasserstofftanksystem in gasförmigem Aggregatzustand, wohingegen die Speicherung des Wasserstoffs alternativ auch in flüssiger Form, gebunden in flüssigen organischen Trägermedien (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC) oder in Form von Methanol oder Ammoniak erfolgen kann.⁷ Im Mobilitätssektor werden aktuell lediglich Gasspeicher und Flüssigwasserstoffspeicher eingesetzt, da alle weiteren Speicherformen energieintensive Zusatzprozesse erfordern, um den Wasserstoff in den reinen, gasförmigen Zustand zu versetzen, den die Brennstoffzelle zum Betrieb benötigt.⁸ Aufgrund der signifikant höheren Energiedichte von Wasserstoffspeichersystemen (0,8 kWh/m³, bei 350 bar) im Vergleich zu Batteriespeichern (ca. 0,27 kWh/m³) können, trotz verringertem Gesamtwirkungsgrad, deutlich höhere Reichweiten bei gleichem Bauraum des Energiespeichers erzielt

1 | Dünnebeil et al., 2015, S. 22.

2 | Hilgers 2016, S. 38.

3 | Kampker und Heimes 2024, S. 113ff.

4 | Balcioglu et al. 2022, S.3.

5 | Kampker und Heimes 2024, S. 158–159.

6 | Ahluwalia et al. 2022, S. 10992

7 | Kahlenberg und Hentschel 09/2023

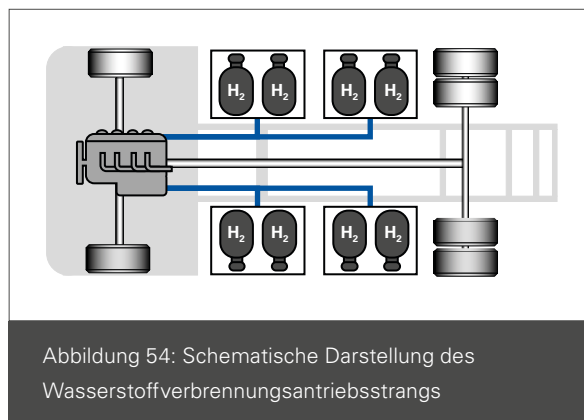
8 | Mayr et al. 07/2021, S. 50

werden.¹ Da Brennstoffzellensysteme zum Start der Energieumwandlung zunächst Energie benötigen, bevor sie diese erzeugen, wird im Fahrzeug eine Pufferbatterie verbaut. Diese ermöglicht zusätzlich die (teilweise) Entkopplung des Betriebspunkts des Brennstoffzellensystems von der Fahrsituation, was zur Steigerung der Energieeffizienz durch den Betrieb in energetisch günstigen Betriebspunkten führt.² Im Vergleich zu batterieelektrischen Antrieben kann die Pufferbatterie jedoch massiv verkleinert werden, was den Einsatz kritischer Rohmaterialien in der Produktion deutlich verringert.³ Der Antrieb eines FCET erfolgt wiederum analog zum BET über eine elektrische Antriebsmaschine und ein Getriebe und wird neben dem Stromfluss aus der Brennstoffzelle über die Pufferbatterie gespeist. Je nach verwendeter Speichertechnologie des Wasserstoffs ändert sich die notwendige Infrastruktur zum Betrieb des Fahrzeugs. Für Gasspeicher werden Tankstellen mit Hochdruckwasserstoffversorgung bis meist 500 bar Vordruck benötigt, um eine Betankung auf den maximalen Speicherdruck von in der Regel 350 bar für Schwerlastfahrzeuge zu ermöglichen. PKW-Speicher erreichen sogar Speicherdrücke von bis zu 700 bar, wobei die Speicherdichte des Wasserstoffs gesteigert wird, zulasten der Energieeffizienz des Systems. Aufgrund der hohen Druckdifferenz während der Betankung und des negativen Joule-Thompson-Koeffizienten des Wasserstoffs erwärmt sich dieser bei der Betankung, wodurch eine Vorkühlung des Wasserstoffs an der Tankstelle notwendig ist, um das Überschreiten der Grenztemperaturen des Tanksystems zu vermeiden.⁴ Für Flüssigwasserstoffspeicher kann für die entsprechende Tankstelle auf den Verbau von Kompressoren und Kühlaggregaten verzichtet werden, da die Verflüssigungstemperatur von Wasserstoff bei circa -253°C liegt und die Speicherung bei Drücken von maximal 20 bar erfolgt. Zur Betankung der Fahrzeuge ist somit lediglich eine kryogene Pumpe erforderlich sowie eine Einrichtung zum Abführen und Verwerten des bei der Betankung durch Wärmeintrag verdampften gasförmigen Wasserstoffs.⁵ Die Speicherdichte von Flüssigwasserstofftanksystemen ist circa drei Mal höher im Vergleich zu 350-bar-Tanks, allerdings erfordert die Verflüssigung einen signifikanten Energieeinsatz. Flüssigwasserstoffspeicher werden aktuell nur in Kleinstserien eingesetzt, wodurch auch die notwendige Infrastruktur noch unzureichend vorhanden und der Ausbau dieser nicht in allen

Wasserstoff-Ausbaustrategien vorgesehen ist. Zusätzlich existieren Konzepte, welche die Bereitstellung beider Aggregatsformen ermöglichen, wodurch der logistische Aufwand in der Anlieferung verringert werden kann, da in diesen Fällen lediglich flüssiger Wasserstoff angeliefert und vor Ort bei Bedarf umgewandelt wird.⁶

Wasserstoffverbrennungsantriebsstrang

Neben der Wandlung von Wasserstoff in elektrische Energie innerhalb der Brennstoffzelle kann dieser auch direkt in einem Wasserstoffverbrennungsmotor in mechanische Antriebsleistung umgewandelt werden. Der schematische Aufbau eines entsprechenden Nutzfahrzeugs ist in Abbildung 54 dargestellt.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

1 | Zellmer 1. Juli 2025, S. 22

2 | Kofler et al. 2024, S. 16364

3 | Specht und Fabianek, S. 22

4 | Airt und Obermeier 2017, S. 22

5 | e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, S. 16–17

6 | e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, S. 16

Grundlegend sind Nutzfahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor identisch zu konventionellen Fahrzeugen aufgebaut, mit dem entscheidenden Unterschied der Verwendung von Wasserstoffspeichertanks anstelle der Diesel- oder Erdgastanks. Aufgrund der geringeren volumetrischen Energiedichte von flüssigem und insbesondere gasförmigem Wasserstoff sind die entsprechenden Speichersysteme bei gleicher Energiemenge signifikant voluminöser, was meist zur Notwendigkeit der Entwicklung neuer Integrationskonzepte führt.¹ Dieser Effekt wird gegenüber brennstoffzellenelektrischen Antrieben durch den insgesamt geringeren Wirkungsgrad noch verstärkt. Das Energiewandlungsprinzip des Wasserstoffverbrennungsmotors ist analog dem konventionellem Verbrennungsmotor aufgebaut und ähnelt dabei insbesondere dem Erdgasverbrennungsmotor. Die Endprodukte dieser Verbrennung sind Wasserdampf und, aufgrund der hohen Prozesstemperaturen im Wasserstoff-Luft-Gemisch, Stickoxide. Damit sind Wasserstoffverbrennungsmotoren lediglich in Bezug auf CO₂ und kraftstoffbedingte Schadstoffe emissionsfrei, nicht jedoch hinsichtlich NO_x.² Aufgrund der hohen Brenngeschwindigkeit von Wasserstoff und somit der erhöhten Anforderungen an die Schließzeiten und Steuerungsgenauigkeit der Einlassventile wird häufig auf eine Saugrohreinjection zurückgegriffen, was zu einer verringerten Leistung bei gleichem Hubraum im Vergleich zur Direkteinspritzung (wie bei modernen Dieselmotoren) führt.^{3,4} Abgesehen von dieser Abweichung liegen die Unterschiede im Grundaufbau zwischen konventionellem Verbrennungsmotor und Wasserstoffverbrennungsmotor insbesondere in der Materialauswahl und den Dichtungskonzepten.⁵

Die Kraftübertragung erfolgt analog zum Dieselfahrzeug über ein Getriebe, entsprechende Kardanwellen und Differenziale.

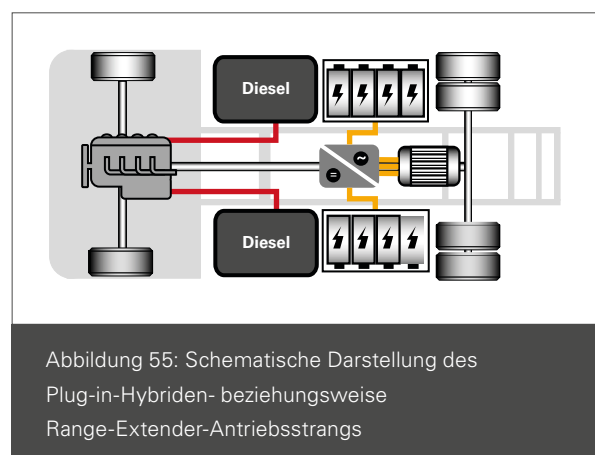
Zur Versorgung der Fahrzeuge mit Wasserstoff können analog zum FCET Gasspeicher oder Flüssigwasserstoffspeicher eingesetzt werden, wodurch auch die notwendige Versorgungsinfrastruktur identisch ist. Ein entscheidender Unterschied in der Integration von Flüssigwasserstoffspeichern in Wasserstoffverbrennerfahrzeuge mit direkter Einspritzung liegt in der Notwendigkeit des Verbaus einer Hochdruckpumpe. Diese

ist notwendig, um die möglichen Effizienzgewinne gegenüber einer Saugrohreinjection realisieren zu können. Während für den Betrieb der Brennstoffzelle und des Verbrenners mit Saugrohreinjection geringe Vordrücke im Bereich bis 20 bar ausreichend sind, wie sie durch das Verdampfen des flüssigen Wasserstoffs erreicht werden können, benötigen die Injektoren des direkteinspritzenden Verbrennungsmotors deutlich höhere Vordrücke im Bereich von bis zu 300 bar.⁶

Insgesamt bietet der Wasserstoffverbrennungsmotor insbesondere den Vorteil der hohen Vergleichbarkeit mit konventionellen Motoren, wodurch die Integration dieser in bestehende Fahrzeugarchitekturen und Produktionsanlagen mit geringerem Aufwand verbunden ist. Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor verursacht je nach Betriebspunkt weiterhin messbare NO_x-Emissionen, auch wenn sie im sehr mageren Betrieb deutlich abnehmen. Da seine Infrastrukturanforderungen im Wesentlichen der Brennstoffzelle entsprechen und der Wirkungsgrad niedriger liegt, wird der H₂-ICET heute vor allem als Übergangstechnologie innerhalb der Mobilitätswende eingeordnet.⁷

Sonderbauformen: Plug-in-hybrider- beziehungsweise Range-Extender Antriebsstrang

Neben rein batterieelektrischen und brennstoffzellenelektrischen Antrieben stellen Plug-in-hybride- und sogenannte Range-Extender-Antriebsstränge eine weitere Möglichkeit dar, elektrische Traktion mit einem verbrennungsmotorischen Aggregat zu kombinieren. Der schematische Aufbau eines entsprechenden Nutzfahrzeugs ist in Abbildung 55 dargestellt.



Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026

1 | Gerstein et al. 2023, S. 9–10

2 | Schrank et al. 2021, S. 24

3 | Abubakar et al. 2025, S. 3510

4 | Schrank et al. 2021, S. 40–41

5 | Schrank et al. 2021, S. 14

6 | Schrank et al. 2021, S. 22

7 | Mayr et al. 07/2021, S. 44

Grundlegend orientiert sich die Fahrzeugarchitektur an einem batterieelektrischen Lastkraftwagen mit zentralem oder achsintegriertem Elektromotor, Leistungselektronik und einer traktionsseitig ausgelegten Hochvoltbatterie. Ergänzt wird dieses System um einen Verbrennungsmotor mit angekoppeltem Generator und einem konventionellen Kraftstoffspeicher, der abhängig vom Fahrzeugkonzept mit Diesel, Erdgas oder alternativen Kraftstoffen betrieben werden kann.

In der Auslegung von Plug-in-Hybriden und Range-Extender-Fahrzeugen für den schweren Straßengüterverkehr werden typischerweise zwei Grundkonzepte unterschieden. Beim klassischen Plug-in-Hybridantrieb ist der Verbrennungsmotor direkt in den Antriebsstrang eingebunden und kann das Fahrzeug gemeinsam mit dem Elektromotor mechanisch antreiben (Parallel- oder leistungsverzweigter Hybrid). Der elektrische Fahranteil wird über eine im Vergleich zum Mildhybrid deutlich vergrößerte Batterie realisiert, die über das Stromnetz extern geladen werden kann. Beim Range-Extender-Konzept ist der Verbrennungsmotor hingegen ausschließlich über den Generator elektrisch mit dem Antriebsstrang gekoppelt (serieller Hybrid), das heißt, der Fahrtrieb erfolgt ausschließlich über den Elektromotor. Der Verbrennungsmotor dient primär dazu, während der Fahrt elektrische Energie nachzuliefern und so die rein elektrische Reichweite zu verlängern. Die Energieversorgung des Fahrzeugs erfolgt somit zweigleisig über den Kraftstofftank des Verbrennungsmotors sowie eine externe Ladeinfrastruktur für die Hochvoltbatterie. Im typischen Betriebsstrategiekonzept wird zunächst im sogenannten „Charge-Depleting“-Modus gefahren, in dem der elektrische Fahranteil maximiert und der Verbrennungsmotor nur in Ausnahmefällen zugeschaltet wird. Nach Unterschreiten eines definierten Ladezustands wechselt das Fahrzeug in einen „Charge-Sustaining“-Modus, in dem der Range-Exten-

der beziehungsweise der Hybridantrieb den Batterieladezustand innerhalb eines vorgegebenen Fensters hält und so längere Fahrten ohne externe Nachladung ermöglicht. Durch eine geeignete Steuerung der Lastpunkte des Verbrennungsmotors können Wirkungsgradvorteile genutzt und lokale Emissionen in sensiblen Bereichen reduziert werden, während auf Langstrecken weiterhin die hohe Energiedichte flüssiger Kraftstoffe zur Reichweitenverlängerung beiträgt.

Insgesamt bieten Plug-in-Hybride und Range-Extender-Antriebsstränge für Lastkraftwagen insbesondere den Vorteil einer hohen betrieblichen Flexibilität sowie der Möglichkeit lokaler Emissionsfreiheit in definierten Zonen, ohne die für rein elektrische Antriebe erforderlichen großen Batteriekapazitäten vollständig vorhalten zu müssen. Dem stehen jedoch eine erhöhte Systemkomplexität, zusätzlicher Bauraum- und Massebedarf für den Verbrennungsmotor und die doppelte Infrastrukturabhängigkeit aus Lade- und Kraftstoffversorgung gegenüber. Vor dem Hintergrund dieser Abwägungen werden Plug-in-Hybrid- und Range-Extender-Konzepte im Schwerlastsegment häufig als Übergangslösung für spezifische Einsatzprofile betrachtet, in denen sowohl elektrische Fahranteile mit strengen Emissionsanforderungen als auch lange, infrastrukturschwache Streckenabschnitte abgedeckt werden müssen.

	Verteilerverkehr	Linienverkehr	Fernverkehr
Fahrdistanz je Tag	■ 300–500 km	■ 400–600 km	■ 600–800 km
Masse des Fahrzeugs	■ 12–20 t	■ 20–35 t	■ 6–40 t
Betriebsmodus	■ Linienverkehr	■ Linienverkehr	■ Charterverkehr
Laden/Tanken	■ vornehmlich am Depot	■ Gemischt	■ Unterwegs

Abbildung 56: Unterteilung der N3-Fahrzeugklasse in Verteiler-, Linien- und Fernverkehr

Quelle: eigene Darstellung PEM, 2026



9. Disclaimer

9.1 Erklärung zu generativer KI und KI-gestützten Technologien im Schreibprozess

Bei der Erstellung dieser Arbeit haben die Autoren ChatGPT-Open AI 5.x verwendet, um Formulierungen zu verbessern und die Rechtschreibung zu überprüfen. Nach der Nutzung dieses Dienstes haben die Autoren den Inhalt überprüft und bei Bedarf überarbeitet und übernehmen die volle Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung

9.2 Hinweis zur Quellenverwendung:

Soweit im Text keine spezifische Quelle angegeben ist, beruhen die dargestellten Einschätzungen, Annahmen und Abgrenzungen auf eigenen Analysen der Autoren sowie auf deren langjähriger Praxis- und Projekterfahrung im Bereich Nutzfahrzeuge, alternative Antriebe sowie der Batterie-, E-Motor- und Brennstoffzellenproduktion.

Literaturverzeichnis

(2024) VARTA startet modernste Heimspeicher-Produktion in Deutschland. URL: <https://www.varta-ag.com/de/ueber-varta/news-presse/details/varta-startet-modernste-heimspeicher-produktion-in-deutschland>.

(2025) E-Lkw bleiben in Deutschland bis 2031 von der Maut befreit. URL: <https://www.e-mobilbw.de/service/meldungen-detail/e-lkw-bleiben-in-deutschland-bis-2031-von-der-maut-befreit> [Abgerufen: 24.11.2025].

(2025) LKW-Maut. URL: <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html> [Abgerufen: 02.12.2025].

Abubakar, S. Said, M.F.M. Abas, M. Khalid, A. Roslan, M.F. Ismail, N. Umaru, S. Narayan, S. Kaisan, M. (2025): „Recent progress on hydrogen-fueled port fuel injection spark ignition engine: A systematic review“. In: Thermal Science, 29.

acea (2025): „Vehicles on european Roads“, 2025.

ADAC (2021) So viele Tankstellen gibt es in Deutschland. URL: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/> [Abgerufen: 24.11.2025].

Adrian O'Connell, Nikita Pavlenko, Georg Bieker, Stephanie Searle (2023) Lifecycle-assessment-trucks-and-buses-emissions-Europe.

Ahluwalia, R.K. Wang, X. Star, A.G. Papadias, D.D. (2022): „Performance and cost of fuel cells for off-road heavy-duty vehicles“. In: International Journal of Hydrogen Energy, 47.

Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, L-2985 Luxemburg: „Richtlinie (EU) 2023/2413“.

Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union: „Durchführungsbeschluss (EU) 2025/1786“.

Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union: „Durchführungsbeschluss (EU) 2025/792“.

Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union: „Verordnung (EG) Nr. 595 2019 (EU)“.

Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union: „Verordnung (EU) 2024/1610“.

Arbeitsgebiete. URL: <https://www.isc.fraunhofer.de/de/arbeitsgebiete.html>.

Arlt, W. Obermeier, J. 2017 Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr. Machbarkeitsstudie.

Aziz, M. (2021): „Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety“. In: Energies, 14.

Bayerlein, M./Hausmann, J./Heimes, H./Kampker, A. (2025): „A comprehensive techno-economic evaluation of fuel cell electric trucks“. In: Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 32.

Beste, D. (2022) Wie sich Wasserstoff in Aluminiumlegierungen zähmen lässt. URL: <https://www.springerprofessional.de/korrosion/metalle/wie-sich-wasserstoff-in-aluminiumlegierungen-zaehmen-laesst/20150950>.

Binder, A. (2017) Elektrische Maschinen und Antriebe. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.

Broughton, J./Smet, V./Tummala, R.R./Joshi, Y.K. (2018): „Review of Thermal Packaging Technologies for Automotive Power Electronics for Traction Purposes“. In: Journal of Electronic Packaging, 140.

Canal Marques, A./Cabrera, J.-M./Malfatti, C.d.F. (2013): „Printed circuit boards: a review on the perspective of sustainability“. In: Journal of environmental management, 131.

Carla Estorilio, Marcelo César Simião (2006): „Cost reduction of a diesel engine using the DFMA method“. In: Product: Management & Development, 2006.

Chowdhury, S./Gurpinar, E./Ozpineci, B. (2022): „Capacitor Technologies: Characterization, Selection, and Packaging for Next-Generation Power Electronics Applications“. In: IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8.

Dosiertchnik für die Automobilindustrie und Elektromobilität. URL: <https://www.dopag.com/de-de/maerkte/automobilindustrie-e-mobilitaet/>.

Drexler, D./Kampker, A./Born, H./Nankemann, M./Hartmann, S./Kulawik, T. (2025): „Advances in electric motors: a review and benchmarking of product design and manufacturing technologies“. In: e+i Elektrotechnik und Informationstechnik, 142.

Durkin, K./Khanafar, A./Liseau, P./Stjernström-Eriksson, A./Svahn, A./Tobiasson, L./Andrade, T.S./Ehnberg, J. (2024): „Hydrogen-Powered Vehicles: Comparing the Powertrain Efficiency and Sustainability of Fuel Cell versus Internal Combustion Engine Cars“. In: Energies, 17.

Elsner, H./Erdmann, M./Liedtke, M. 2025 Seltene Erden. Projekte - Förderung - Weiterverarbeitung. DERA Rohstoffinformationen. 61.

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität. Entwicklungsstand und Forschungsbedarf.

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Hg. 2023 Strukturstudie BW 2023. Transformation der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie in Baden-Württemberg durch Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung [online]. Benjamin Frieske; Samuel Hasselwander; Özcan

Deniz; Sylvia Stieler; Simon Schumich. URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobil_BW_Strukturstudie_BW_2023.pdf.

Expertise. URL: <https://www.freudenberg.com/de/technologien/expertise>.

Faserverstärkte Profile und technische Wickelteile. URL: <https://www.ernst-kuehne.de/de/>.

Filtration für sauberes Wasser: Lösungen gegen Wasserverschmutzung. URL: <https://www.mann-hummel.com/de/filtration/wasserfiltration-fuer-sauberes-wasser.html> [Abgerufen: 06.01.2026].

Florian Kleiner, Horst E. Friedrich: „Maintenance & Repair Cost Calculation and Assessment of Resale Value for Different Alternative Commercial Vehicle Powertrain Technologies“.

Ford Trucks – CAD Modell des Ford F-MAX

Forschung am Elektrotechnischen institut. URL: <https://www.eti.kit.edu/forschung.php> [Abgerufen: 06.01.2026].

Forschung. URL: <https://www.iew.uni-stuttgart.de/forschung/> [Abgerufen: 06.01.2026].

Forschung. URL: <https://www.ilea.uni-stuttgart.de/forschung/> [Abgerufen: 06.01.2026].

Forschung. URL: <https://www.zsw-bw.de/forschung.html>.

Fries, M./Lehmeyer, M./Lienkamp, M. (2017): IEEE.

Fritz, D./Heinfellner, H./Lambert, S. 2022 Die Ökobilanz von schweren Nutzfahrzeugen und Bussen. Bewertung ausgesuchter Anwendungsfälle alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich Reduktionspotenzial von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch [online]. Wien. Report/Umweltbundesamt. REP-0801. URL: https://www.umweltbundesamt.at/studien-reports/publikationsdetail?pub_id=2422.

Führen, D./Graw, M./Kröll, L./Ilsemann, J./Robinius, M./Wienert, P. (2022): „Wertschoepfungskette Brennstoffzelle“.

Gerling, D. (2022) Elektrische Maschinen und Antriebe. URL: <https://www.unibw.de/eea/studium/vorlesungen-und-seminaruebungen/ema-b-sc/vorlesungsskript-ema-01-2022-final-1.pdf>.

Gerstein, D./Soraaei, M./Wagner, P.L. 2023 Nachhaltiger Schwerlastverkehr. Status quo und Anforderungen an den Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur für klimafreundliche Nutzfahrzeuge in Deutschland.

Gesinterte Magnete. URL: <https://magnete.de/produkte/gesinterte-magnete/>.

Götz Fuchslocher Mahle-Strategie für mehr Effizienz von Nutzfahrzeugen. URL: <https://www.automobil-produktion.de/management/mahlestrategie-fuer-mehr-effizienz-von-nutzfahrzeugen/1023743> [Abgerufen: 26.11.2025].

Günther, C./Pahle, M./Govorukha, K./Osorio, S./Fotiou, T. (2025): „Carbon prices on the rise? Shedding light on the emerging second EU Emissions Trading System (EU ETS 2)“. In: Climate Policy.

H2 MOBILITY (2025) www.h2.live. URL: <https://h2.live/> [Abgerufen: 05.03.2023].

Hacker, F./Gnann, T. (2025): „Truck depot charging“, 2025.

Han, J./Feng, J./Chen, P./Liu, Y./Peng, X. (2022): „A review of key components of hydrogen recirculation subsystem for fuel cell vehicles“. In: Energy Conversion and Management: X, 15.

Hausmann, J./Kampker, A./Kemperdick, T./Letmathe, P. (2025): „An economic and environmental analysis of retrofitted fuel cell electric heavy-duty trucks“. In: Applied Energy, 399.

HERMANN, A./CHAUDHURI, T./SPAGNOL, P. (2005): „Bipolar plates for PEM fuel cells: A review“. In: International Journal of Hydrogen Energy, 30.

Hoekstra, A./Alkemade, F. (2025): „Using learning curves to guide the energy transition with the example of heavy electric trucks“. In: Npj sustainable mobility and transport, 2.

Hoepke, E./Breuer, S. (2016) Nutzfahrzeugtechnik. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden.

Innovative Lösungen für Dosieren, Imprägnieren, Heißnieten und Plasma. URL: <https://www.bdtronic.com/>.

Jörn Neuhausen/Philipp Rose/Jan-Hendrik Bomke/Luca Tendera: „Battery-electric trucks on the rise“, 2024.

Jou, Y.-T./Lin, M.-C./Silitonga, R.M./Lu, S.-Y./Hsu, N.-Y. (2024): „A Systematic Model to Improve Productivity in a Transformer Manufacturing Company: A Simulation Case Study“. In: Applied Sciences, 14.

Kahlenberg, A./Hentschel, M. 09/2023 Factsheet Wasserstoffspeicherung. Ergebnisse im Rahmen des Projektes „HyExperts Wasserstoffmodellregion Chemnitz“.

Kampker, A./Heimes, H./Kehrer, M./Hagedorn, S./Euchner, P./Butzer, H. (2024a): „Economic and ecological Analysis of Hydrogen Storage Systems“. In: CPSL, 2024.

Kampker, A./Heimes, H.H. (2024) Elektromobilität. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.

Kampker, A./Heimes, H.H./Born, H./Nankemann, M./Backes, T. 2024b Production Process of a Hairpin Stator. 3. Auflage. PEM der RWTH Aachen.

Kampker, A./Heimes, H.H./Born, H./Nankemann, M./Bajah, Y. 2024c Production Processes of Rotors. PEM der RWTH Aachen.

Karnowski, V./Kümpel, A.S. (2016). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Khan, S.M./Mann, A./Peterson, D. 2021 The Semiconductor Supply Chain: Assessing National Competitiveness. Center for Security and Emerging Technology.

Know-how entlang des gesamten Batterieproduktionsprozesses. URL: <https://www.ffb.fraunhofer.de/de/unsere-kompetenzen.html>.

Kofler, S./Du, Z.P./Jakubek, S./Hametner, C. (2024): „Predictive Energy Management Strategy for Fuel Cell Vehicles Combining Long-Term and Short-Term Forecasts“. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, 73.

Köllner, C. 2025 Konzepte für die H₂-Einblasung im Überblick.

Laadjal, K./Cardoso, A.J.M. (2023): „Multilayer Ceramic Capacitors: An Overview of Failure Mechanisms, Perspectives, and Challenges“. In: Electronics, 12.

Labormischer. URL: <https://www.eirich.de/de/produkte/labormischer> [Abgerufen: 06.01.2026].

Lee, T.-E./Kim, H.-J./Yu, T.-S. (2023): https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96729-1_38.

LEIFIPhysik (2023) Wärmekraftmaschinen. URL: <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/waermekraftmaschinen/grundwissen/viertakt-ottomotor>.

Link/Steffen (2021): „H₂ mobility via fuel cell or IC engine: alternatives for heavy-duty vehicles in Germany and India?“.

Magliano, A./Perez Carrera, C./Pappalardo, C.M./Guida, D./Berardi, V.P. (2024): „A Comprehensive Literature Review on Hydrogen Tanks: Storage, Safety, and Structural Integrity“. In: Applied Sciences, 14.

MAHLE GmbH (2024) Valeo und MAHLE erweitern ihre Produktportfolios magnetfreier E-Motoren für obere Fahrzeugsegmente. URL: <https://newsroom.mahle.com/press/de/press-releases/valeo-und-mahle-erweitern-ihre-produktportfolios-magnetfreier-e-motoren-fur-obere-fahrzeugsegmente-106048#> [Abgerufen: 19.11.2025].

Märkte. URL: <https://www.exyte.net/de-DE/Markets>.

Mayr, K./Hofer, F./Ragowsky, G./Gruber, W./Arnberger, A. 07/2021 Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte.

Mo, S./Du, L./Huang, Z./Chen, J./Zhou, Y./Wu, P./Meng, L./Wang, N./Xing, L./Zhao, M./Yang, Y./Tang, J./Zou, Y./Ye, S. (2023): „Recent Advances on PEM Fuel Cells: From Key Materials to Membrane Electrode Assembly“. In: Electrochemical Energy Reviews, 6.

Morales-Ospino, R./Celzard, A./Fierro, V. (2023): „Strategies to recover and minimize boil-off losses during liquid hydrogen storage“. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 182.

Neudorfer, H. (2009) Elektrische Antriebe in Fahrzeugen. URL: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/rd/ew_vortraege/091022_neudorfer_antrittsvorlesung.pdf.

NOW GmbH (2026) Neuzulassungen leichter, mittlerer und schwerer Nutzfahrzeuge. URL: <https://www.now-gmbh.de/datenfinder/neuzulassungen-bestand-leichter-mittlerer-und-schwerer-nutzfahrzeuge/>.

Produkte. URL: <https://www.buerkert.de/de/produkte/> [Abgerufen: 06.01.2026].

Produkte. URL: <https://www.dynexa.de/produkte/cfk-antriebswellen/composite-antriebswellenrohr/> [Abgerufen: 06.01.2026].

Produkte. URL: <https://www.fumatech.com/de/products/> [Abgerufen: 06.01.2026].

Produkte. URL: <https://www.gemu-group.com/de-de/produkte/> [Abgerufen: 06.01.2026].

Prozessautomatisierung. URL: <https://www.rampf-group.com/de/produkte-loesungen/engineering/prozessautomatisierung/>.

Reinhardt, K./Kretzschmar, C./Rebenklau, L./Schul, J./Meyer, A./Marx, C. (2010): „Lead-oxide-free copper thick-film paste for alumina substrates“. In: 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology.

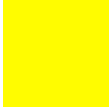
Reinräume. URL: https://schillingengineering.de/produkte/reinraeume/?_gl=1*8e57x4*_up*MQ.*_gs*MQ.*_ga*MTM5MDQ2NTQwNi4xNzY3NzA4MDA0*_ga_LHLLNG172J*_czE3Njc3MDgwMDQkbzEkZzAkdD-E3Njc3MDgwMDQkajYwJGwwJGgxMTY2Njc3NT-U3&gclid=EAlaIqObChMI3MjGu4n3kQMVl6JoCR2YnBA-vEAYASAAEgIP1PD_BwE&gbraid=0AAAAAD_dViN-BLlZZ8qHqK4wy8eauVxi6D.

Sachs, C./Neuburger, M. (2025): „A Data-Based Review of Battery Electric Vehicle and Traction Inverter Trends“.

Sachs, C./Stamer, F./Allgeier, J./Thrimawithana, D./Neuburger, M. (2024): „Optimization-Based Comparative System Evaluation of Single and Dual Traction Inverters with Focus on Partial Load Efficiency and Chip Area“. In: 2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).

Sankar, V.U./Lakshmi, G./Sankar, Y.S. (2022): „A Review of Various Defects in PCB“. In: Journal of Electronic Testing, 38.

- Sari, R./Shah, A./Kumar, P./Cleary, D./Rairikar, S./Sonawane, S.B./Thipse, S.S. (2024): „Hydrogen Internal Combustion Engine Strategies for Heavy-Duty Transportation: Engine and System Level Perspective“. In: SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 06.
- Schrank, M./Langer, V./Jacobsen, B. 2021 Wasserstoffverbrennungsmotor als alternativer Antrieb. Metastudie.
- Schröder, D./Kennel, R. (2021) Elektrische Antriebe – Grundlagen. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Sepaintner, F./Scharl, A./Rohrl, F./Bogner, W./Zorn, S. (2020): „Characterization and Production of PCB Structures With Increased Ratio of Electromagnetic Field in Air“. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 68.
- Shoman, W./Yeh, S./Sprei, F./Plötz, P./Speth, D. (2023): „Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements“. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, 121.
- Specht, J.M./Fabianek, P. Vergleich von Wasserstoff- und Elektromobilität. Technische, ökonomische, soziale und ökologische Aspekte.
- Spring, E. (2009) Elektrische Maschinen. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2025): „Umsatz- und Beschäftigungsstatisik nach Wirtschaftszweigen (2023) - Daten angefragt“.
- Sven Prawitz Bosch stellt Nutzfahrzeugsparte neu auf. URL: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/bosch-neuer-be-reich-nutzfahrzeugtechnik-a-29fa3cd4d268c-2bd5d4cca496d7d7523/> [Abgerufen: 26.11.2025].
- Tan, D.Q./Wu, X. (2022): „A case study of high-temperature polyetherimide film capacitor fabrication“. In: Materials Today Energy, 30.
- Thadani, A./Allen, G.C. (2023): „Mapping the Semiconductor Supply Chain: The Critical Role of the Indo-Pacific Region“. In: JSTOR.
- Thyssenkrupp (2023) bluemint Steel - CO₂-reduced steel at the cutting edge. URL: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/bluemint/bluemint.html>.
- Toll Collect GmbH (2024) Mautsätze pro Kilometer ab 01. Juli 2024. URL: https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/p1745_mauttarife_07_2024.html [Abgerufen: 24.11.2025].
- TRUMPF Laser. URL: https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/laser/.
- Tung, C.-Y. 2023 Taiwan and the global Semiconductor Supply Chain.
- Ultrasonic welding automotive. URL: <https://www.herrmannultraschall.com/en/branch-solutions/automotive>.
- Valchev, V.C./van den Bossche, A. (2018) Inductors and Transformers for Power Electronics. CRC Press.
- van Basshuysen, R./Schäfer, F. (2017) Handbuch Verbrennungsmotor. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Wang, H./Blaabjerg, F. (2014): „Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters – An Overview“. In: IEEE Transactions on Industry Applications, 50.
- Wasserstofflösungen für mobile und stationäre Anwendungen. URL: <https://www.purem.com/innovation/hydrogen>.
- Wein, L.M. (1988): „Scheduling semiconductor wafer fabrication“. In: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1.
- Wienhausen, A.H. (2019) High Integration of Power Electronic Converters enabled by 3D Printing.
- Yang, L./Agyakwa, P.A./Johnson, C.M. (2013): „Physics-of-Failure Lifetime Prediction Models for Wire Bond Interconnects in Power Electronic Modules“. In: IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 13.
- Zamboni, G. (2019): „Influence of Fuel Injection, Turbocharging and EGR Systems Control on Combustion Parameters in an Automotive Diesel Engine“. In: Applied Sciences, 9.



ZEISS Produkte und Lösungen. URL: <https://www.zeiss.de/corporate/produkte-und-loesungen.html>.

Zellmer, S., 2025 Chancen und Grenzen der Energiespeichertechnologie. Einblicke in die Batterie, Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologien, 1. Juli 2025.

ZF Friedrichshafen AG (2024): „ZF Friedrichshafen AG Geschäftsbericht 2024“.

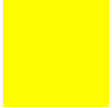
Zhang, Y./Wang, J./Yao, Z. (2023): „Recent Development of Fuel Cell Core Components and Key Materials: A Review“. In: Energies, 16.

Zoll Steuersätze für Nutzfahrzeuge. URL: https://www.zoll.de/DE/Unternehmen/Kraftfahrzeugsteuer/Steuerhoehe/steuerhoehe_node.html#vt-sprg-10 [Abgerufen: 24.11.2025].

Abkürzungsverzeichnis

AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation	MPA	Materialprüfungsanstalt
AMB	Active Metal Brazing	NFZ	Nutzfahrzeug(e)
BET	Batterieelektrischer Lkw/Truck	OEM	Original Equipment Manufacturer
BMS	Batteriemanagementsystem	OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
BPP	Bipolarplatte	PCB	Printed Circuit Board (Leiterplatte)
CAPEX	Capital Expenditures (Anschaffungs- und Investitionskosten)	PDU	Power Distribution Unit (Stromverteilereinheit)
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism	PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
DCB	Direct Copper Bonding (Keramiksubstrat-Technologie)	RED III	Renewable Energy Directive III (Erneuerbare-Energien-Richtlinie, 3. Fassung)
DC/DC	DC/DC-Wandler	SiC	Siliziumkarbid
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit	TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten)
EOL	End-of-Line (Endprüfung)	TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
ETI	Elektrotechnisches Institut	ZET	Zero Emission Trucks
ETS	Emissions Trading System (Emissionshandelssystem)	ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
ETS2	Emissions Trading System 2 (zweites EU-Emissionshandelssystem)		
EU	Europäische Union		
EU-ETS	EU Emissions Trading System (EU-Emissionshandelssystem)		
FCET	Fuel Cell Electric Truck (brennstoffzellelektrischer Lkw/Truck)		
FFB	Fraunhofer Forschungsfertigung Batteriezele		
GaN	Galliumnitrid		
GDL	Gasdiffusionslage		
H2-ICET	Hydrogen Internal Combustion Engine Truck (wasserstoffverbrennender Lkw/Truck)		
HV	High Voltage (Hochvolt)		
ICET	Internal Combustion Engine Truck (dieselvebrennender Lkw/Truck)		
ICT	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie		
IEW	Institut für Elektrische Energieumwandlung		
ILEA	Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe		
ISC	Fraunhofer-Institut für Silicatforschung		
KIT	Karlsruher Institut für Technologie		
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier(s) (flüssige organische Wasserstoffträger)		
MEA	Membran-Elektroden-Einheit		

Abbildung 35: Komponenten und Prozesse der Leistungselektronik	59
Abbildung 36: Kostenstruktur der Leistungselektronik (in €/kW)	61
Abbildung 37: Materialkosten der Leistungselektronik (in €/kW)	61
Abbildung 38: Wertschöpfungsschritte der Leistungselektronik (in €/kW)	62
Abbildung 39: Komponenten und Produktionsverfahren Brennstoffzellen-Stack	64
Abbildung 40: Komponenten und Produktionsverfahren Brennstoffzellen-Peripherie	66
Abbildung 41: Verteilung der Herstellkosten über die Subkomponenten eines Brennstoffzellenstacks [€/kW]	68
Abbildung 42: Anteil der Wertschöpfung durch Produktionskompetenzen in einem Brennstoffzellenstack (prozentual)	68
Abbildung 43: Verteilung der Herstellkosten der BoP auf die Subsysteme [€/kW]	69
Abbildung 44: Anteil der Wertschöpfung durch Produktionskompetenzen in der Herstellung der BoP (prozentual)	72
Abbildung 45: Komponenten und Produktionsverfahren H2-ICET	73
Abbildung 46: Herstellungskosten und wertschöpfende Produktionsverfahren des H2-ICET (prozentual)	74
Abbildung 47: Zusammenfassung der Gap-Analyse in Form einer Ampellogik	83
Abbildung 48: Verschiebung der Wertschöpfung in den Antriebssträngen zwischen den Jahren 2025 und 2035	86
Abbildung 49: Transformationsherausforderungen nach Unternehmensgröße	94
Abbildung 50: Handlungsempfehlungen zur Schaffung attraktiver Rahmenbedingungen	96
Abbildung 51: Schematische Darstellung des konventionellen Verbrennerantriebsstrangs	102
Abbildung 52: Schematische Darstellung des batterieelektrischen Antriebsstrangs	103
Abbildung 53: Schematische Darstellung des brennstoffzellenelektrischen Antriebsstrangs	104
Abbildung 54: Schematische Darstellung des Wasserstoffverbrennungsantriebsstrangs	105
Abbildung 55: Schematische Darstellung des Plug-in-Hybriden- beziehungsweise Range-Extender-Antriebsstrangs	106
Abbildung 56: Unterteilung der N3-Fahrzeugklasse in Verteiler-, Linien- und Fernverkehr	107



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen für den Aufbau des Gesamtbetriebskostenmodells	22
Tabelle 2: Ausgewählte Kosten (Netto) und Verbräuche für alle Szenarien für den Fernverkehr	24
Tabelle 3: Übersicht der Hauptkompetenzen zur Herstellung der Batteriekomponente	50
Tabelle 4: Kompetenzen in der Wertschöpfungskette von Elektromotoren	56
Tabelle 5: Übersicht der Hauptkompetenzen für die Fertigung der Leistungselektronik	63
Tabelle 6: Zusammenfassung der Kernkompetenzen je Komponente	71
Tabelle 7: Handlungsempfehlungen und Entwicklungsfelder zur Sicherung der lokalen Wertschöpfung	92

Impressum

Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue
Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autor:innen

PEM – Chair of Production Engineering of E-Mobility
Components/Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule (RWTH) Aachen
Maximilian Bayerlein, Julius Hausmann, Sicong Deng,
Tim Franitza, Moritz Fuchs, Fabian Jonen

Redaktion und Koordination der Studie

e-mobil BW GmbH
Benjamin Kleiner
Alina Fleck
Dr. Volker Banhardt
Philipp Prinz

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag © d1sk/istockphoto
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden
sich auf der jeweiligen Seite.

Genereller Hinweis

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei
zusammengesetzten personenbezogenen Hauptwörtern
in dieser Studie die männliche Form verwendet.
Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der
Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.
Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe
und beinhaltet keine Wertung.

April 2026

© 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.

Die in dieser Studie verwendete Kartenbasis stammt von einem Drittanbieter. Die darin dargestellten Staats- und Grenzverläufe beruhen auf dessen Datenbasis und stellen keine politische Bewertung oder Positionierung der Autoren dieser Studie dar.



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

